محاضرات فى الكهربية

الفرقة الثانية تربية عام
شعبة طبيعة وكيمياء

دكتور
عادل جادالكريم عبادى محمد
قسم الفيزياء

التزم الأول
العام الجامعي 2023 - 2024 م

المحتويات

الفصل الاول

ملخص لبعض موضوعات الكهرباء التى تم دراستها

النظرية الذرية والكهرباء الساكنة وقانون كولوم 2

المجال الكهربى وكثافة الشحنة وخطوط القوى الكهربية 8

قانون جاوس وتطبيقاته 17

الفصل الثاني

حركة الجسيمات المشحونة بالمجالات الكهربية والمغناطيسية 23

تطبيقات على استخدامات المجالات الكهربية والمغناطيسية

الفصل الثالث

مبادئ ودوائر التيار المستمر 76

الفصل الرابع

المغناطيسية الكهربية 4

الفصل الخامس

الدوائر الكهربية المركبة..... 94

الفصل السادس

قناطر التيار المستمر..... 106

الفصل الاول

ملخص لبعض موضوعات الكهرباء التى تم دراستها

-

النظرية الذرية والكهرباء الساكنة

(١-١) مقدمــة

Introduction

عرفت الظواهر الطبيعية للكهرباء قبل القرن التاسع عشر مثل تكـهـرب الكـهـرمـان (electrification of amber) والــبرق (lightning) وصـدمـة ثعـبـان البـحـر (the shock of an electric ee!). ففي عام ٦٠٠ قبـل الميلاد اكتشفت ظاهرة جذب الكهرمان للأجسام الخفيفة كقطعة الورق بعد دلكها بقطعة من فرو الحيوانات . وبعد هذا الاكتشـاف حتى ظهـور كتاب العالم جلبرت (Sir W. Gilbert) عام ١٦٠٠م لم تكتشف ظواهـر مهمة عن الكهرباء الساكنة حيث ثبت تجريبيا تكهرب معظم المواد بالاحتكاك وفي بداية القرن الثامن عشر توصل العلماء إلى صنع أجهزة لدراسة الظواهر الكهربية مثل جهاز الإلكتروسكوب الورقي وميزان الالتواء (torsion balance) وفي هذا القـرن أيضا تم فصل الكهرباء إلى قسمين أحدهما كهرباء ساكنة والأخرى كهرباء

تيارية لاختلافهما من حيث الاتجاه وطرق الحصول عليهما حيث تفسر الكهرباء الساكنة ظاهرة جذب الكهرمان بينما الكهرباء التيارية توضح طبيعة البرق والكهرباء الناتجة عن بعض الحيوانات.

وتفسير ظاهرة الكهرباء الساكنة يعود إلى التركيب الذري للمادة (atomic structure of matter) حيث تتألف المادة من جزيئات (molecules) وذرات (atoms) وكل ذرة تحتوي على نواة (nucleus) بها بروتونات (protons) ونيوترونات (neutrons) وتدور حول هذه النواة إلكترونات (electrons). أما نوع شحنات هذه الجسيمات، فالإلكترون يحمل شحنة سالبة (negative charge) ويرمز لها بالرمز (e-) والبروتون يحمل شحنة موجبة (positive charge) ويرمز لها بالرمز (e+) أما النيوترون فهو متعادل الشحنة (neutral charge). وذرة أي عنصر في حالتها الطبيعية متعادلة الشحنة ولذلك فإن عدد الإلكترونات التي تدور حول النواة يكون مساويا لعدد البروتونات داخل النواة ويسمى هذا العدد بالعدد الذري (atomic number) أما العدد الكلي لمجموع البروتونات والنيوترونات فيسمى بالعدد الكتلي (mass number). وبالتالي فإن المادة لا تكون مشحونة ولكن الشحنة تظهر فقط عليها إذا تمكنا من فصل أحد نوعيّ الشحنة في ذرات هذه المادة عن النوع الآخر. ويتم هذا الفصل بواسطة الاحتكاك أو الدلك أو تعرض هذه المواد لطاقة ضوئية أو حرارية أو إشعاع ذري.

ولقد كان للاحتكاك الفضل الأول في كشف نوعيّ الشحنات فالكهرمان المدلوك بفرو الحيوان يكتسب إلكترونات من الفرو فتصبح شحنته سالبة بينما يفقد الفرو بعض إلكتروناته فتصبح شحنته موجبة، ومعنى هذا أن بعض الإلكترونات انتقلت بالدلك من الفرو إلى الكهرمان، وقد وجد أيضا أن الزجاج المدلوك بالحرير يكتسب شحنة موجبة بينما يكتسب الحرير شحنة سالبة، أي أن بعض الإلكترونات انتقلت بالاحتكاك من الزجاج إلى الحرير، ولقد أثبتت التجارب العملية وجود قوى تجاذب وتنافر بين الأجسام المشحونة فالشحنة الموجبة تتجاذب مع الشحنة السالبة وتتنافر مع الشحنة الموجبة. *حيث تتجاذب الشحنات المختلفة في النوع وتتنافر الشحنات المتشابهة*.

ومن الحقائق المهمة أن الشحنة الكهربية تظهر على هيئة أعداد صحيحة للشحنات الإلكترونية وأن شحنة الإلكترون هي أصغر شحنة سالبة موجودة في الطبيعة وشحنة البروتون هي أصغر شحنة موجبة وقيمتهما هي :

$$(-e) = (+e) = 1.6029 \times 10^{-19}\,C$$

وتكون شحنات الجسيمات الأولية إما صفرا مثل النيوترونات أو أعدادا صحيحة لشحنة الإلكترون. كذلك فإن شحنات الإيونات (ions) أو النويات الذرية (atomic nuclei) عبارة عن أعداد صحيحة إما لشحنة الإلكترون أو البروتون.

والجدول (١-١) يوضح بعض الجسيمات الأولية والمكتشفة عمليا مع قيمة الشحنة وكذلك كتلة الجسيم. علما بأن كتلتي الإلكترون والبروتون هما :

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31}\,kg$$
$$M_p = 1.673 \times 10^{-27}\,kg$$

ومن الحقائق المهمة أيضا أن الشحنات لا تفنى (destroyed) ولا تستحدث (created) وقد اتضح ذلك مما تقدم ذكره وهو أن الشحنة تظهر على الدالك والمدلوك نتيجة لانتقال الإلكترونات من جسم إلى آخر، ويعرف هذا بقانون بقاء الشحنة (law of charge conservation) والذي ينص على أن :

«القيم الابتدائية والنهائية لمجموع الشحنة الكهربية الداخلة في التفاعل يجب أن تكون واحدة».

وهناك أمثلة أخرى منها

أ ـ انحلال البورون غير المستقر (unstable boron decay) إلى كربون مستقر حسب المعادلة

$$^{12}_{5}B \rightarrow ^{12}_{6}C + e + \nu$$
$$5e \rightarrow 6e + \bar{e} + 0$$

جـدول (١-١): أسماء بعض الجسيمات الأولية مع قيمة كتلتها وشحنتها

الكتلة	الشحنة	الرمز	Particle name	اسم الجسيم
$1.000 \times M_p$	e	P	Proton	بروتون
1.001 "	0	n	Neutron	نيوترون
0.000545 "	$-e$	e^-	Electron	إلكترون
0.000545 "	e	e^+	Positron	بوزترون
0.1126 "	$-e, +e$	μ^-, μ^+	Muon	ميون
0.1438 "	$+e, -e, o$	π^+, π^-, π^o	Pi-meson	باي ميزون
0 "	0	γ	Photon	فوتون
0 "	0	$\bar{\nu}$	Neutrino	نيوترينو
0 "	0	ν^-	Antineutrino	ضديد النيوترينو
1.189 "	0	Λ^o	Lambda	لامبدا
0.82 "	$+e, o, -e$	$\varrho^+, \varrho^o, \varrho^-$	Rho meson	روميزون
0.836 "	0	ω	Omega meson	اوميقا ميزون

ب ـ ***الحصول على كربون ١٤*** *(carbon 14)* نتيجة لتصادم نيوترون مع ذرة نيتروجين

$$^{14}_{7}N + n \rightarrow ^{14}_{6}C + P$$
$$7e + 0 \rightarrow 6e + e$$

جـ ـ ***الانحلال الاشعاعي لتصادم نيوترون مع اليورانيوم*** $^{235}_{92}U$ والذي ينتج عنه $^{236}_{92}U$ الذي ينشطر (split) إلى زينون (xenon) $^{140}_{54}Xe$ واسترونشيوم (strontium) $^{94}_{38}Sr$ ونيوترونات وفوتونات .

(١-٣) المجـال الكـهـربي

Electric Field

يصاحب أي جسم مشحون مجال كهربي يحيط به ويؤثر على أية شحنة توضع عند أي نقطة قريبة منه بقوة تنافر أو قوة تجاذب حسب نوعية الشحنات. وهذا يشبـه إلى حـد كبير وجود جسم ما في مجال جاذبية الأرض حيث تجذبه إليها ما لم يخرج عـن نطـاق أو مجال جاذبية الأرض. ويمكن الكشف عن وجـود مجال كهربي عند نقطة ما بوضـع جسـم مشحون بشحنة q_0 ، وتسمى شحنة اختبار (test charge) ، فإذا تأثرت هذه الشحنة بقوة كهربية فيعني هذا وجود مجال كهربي عندها.

ولما كانت القوة كمية متجهة (أي ذات مقدار واتجاه) كان المجال الكهربي كمية متجهـة أيضا له مقدار واتجاه. فإن كان المجال الكهربي ناتجا عن شحنة قدرها q فإنه يؤثر على شحنة اختبار q_0 ، تبعد عنها مسافة r ، بقوة قدرها F . وتسمى القيمة $\frac{F}{q_0}$ بشدة المجال الكهربي E (intensity of electric field) أي أن :

(١-٥) كـثـافـة الشحـنـة

Charge Density

عرف من البنود السابقة أن الجسم المشحون يحمل شحنات هي مضاعفات صحيحة من شحنة الإلكترون فإذا اعتُبِر الجسم المشحون يحمل عددا كبيرا جدا من الشحنات فإنه يمكن النظر إلى الشحنة الكهربية على أنها موزعة توزيعا مستمرا.

ويمكن بهذا تعريف ثلاثة أنواع من الكثافة الكهربية :

(١-٥-١) الكثافة الحجمية Volume charge density

ويرمز لها بالرمز ϱ وتساوي :

$$\varrho = \frac{dq}{dV} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١-٣٦)$$

حيث dq عنصر الشحنة المحصورة داخل الحجم dV الذي يحيط بالنقطة المراد تقدير ϱ فيها ووحدة قياس الكثافة الحجمية هي C/m^3.

(١-٥-٢) الكثافة السطحية Surface charge density

ويرمز لها بالرمز σ وهي تعبر عن توزيع الشحنة على سطح بحيث يمكن إهمال

سمكه بالنسبة للأبعاد الأخرى.

$$\sigma = \frac{dq}{dS} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١-٣٧)$$

حيث dq الشحنة الموزعة على السطح dS المحيط بالنقطة المراد تقدير σ فيها ووحدة قياس الكثافة السحطية هي C/m^2.

(١-٥-٣) الكثافة الطولية Linear charge density

ويرمز لها بالرمز λ وتمثل توزيع الشحنة على سلك مهمل المقطع بالقياس لأبعاده الأخرى.

$$\lambda = \frac{dq}{dl} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (١-٣٨)$$

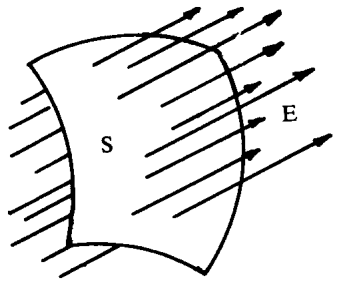
حيث dq الشحنة الموزعة على الطول dl المحيط بالنقطة المراد قياس λ فيها ووحدة قياس الكثافة الطولية هي C/m.

(١-٦) المجال الناتج عن توزيع مستمر للشحنة الكهربية

Field due to a Continuous Distribution of Charge

سبق أن دُرس المجال الكهربي لشحنات كهربية ممثلة على هيئة نقطة أو نقط (point charges) ولدراسة المجال الناتج عن شحنات موزعة على أجسام ذات أحجام محدودة (finite size) فإن المعادلة (١-١٧) تصبح :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int \frac{dq}{r^2}\vec{i}_r = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int \frac{dq}{r^3}\vec{r} \ldots \quad (١-٣٩)$$



شكل (١٣-١): حساب المجال الكهربي بمعرفة خطوط القوى N المارة من سطح مساحته S

$$N = ES \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٤٧أ - ١)$$

وبذلك يمكن القول بأن:

شدة المجال عند نقطة ما تمثل عدد خطوط القوى الكهربية التي تقطع وحدة المساحة عموديا عند هذه النقطة.

وطبقا لهذا التعريف والاستعانة بشكل (١٤-١) فإن عدد الخطوط العمودية dN التي تقطع المساحة dS من سطح غلاف كروي نصف قطره r وتقع في مركزه شحنة موجبة q تعطى بالمعادلة:

$$dN = E \cdot dS$$

حيث E شدة المجال عند أي نقطة على سطح الكرة ويعطى بالمعادلة:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}$$

$$\therefore dN = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\,dS$$

∴ مجموع خطوط القوى N التي تقطع سطح الكرة كلها في اتجاه عمودي هى:

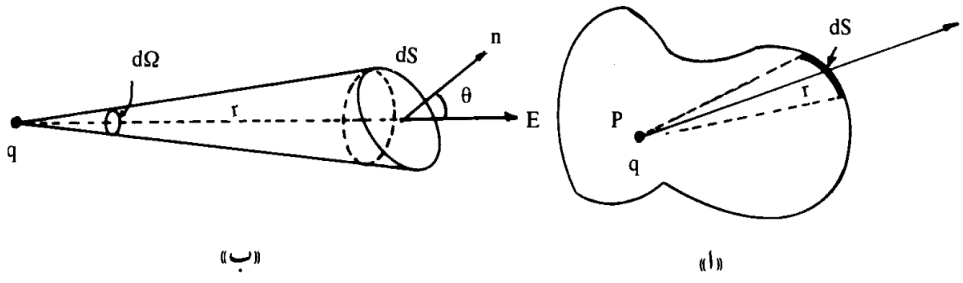
$$\therefore N = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\int_0^{4\pi r^2} dS$$

$$= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}(4\pi r^2)$$

$$\therefore N = \frac{1}{\varepsilon_0}\,q \cdot \cdot \qquad (٤٧ب - ١)$$

ويعمم جاوس هذه النتيجة فهو يثبت أنه إذا تعرض أي سطح مقفل لمجال كهربي فإن عدد خطوط القوى التي تنفذ منه إلى الخارج تساوي $\frac{1}{\varepsilon_0}$ مضروبا في المجموع الجبري للشحنات المحصورة داخل هذا السطح بصرف النظر عن كيفية توزيع الشحنات داخل السطح . أو بقول آخر ***«يتناسب الفيض الكهربي على سطح مغلق (closed surface) مع المجموع الجبري للشحنات داخل هذا السطح»*** .

ولإثبات هذه النظرية في الحالة العامة، يفترض وجود شحنة مقدارها q عند النقطة P. كما في شكل (١٥أ ـ ١)، داخل سطح مغلق غير منتظم الشكل. في هذه الحالة تكون شدة المجال مختلفة من نقطة إلى نقطة أخرى على السطح ، وإذا لم يكن السطح في جميع نقطه عموديا على المجال فإنه يمكن حساب عدد خطوط القوى المارة بالسطح بالطريقة التالية :



«ب» «ا»

شكل (١٥-١): أ ـ سطح مغلق غير منتظم الشكل توجد بداخله شحنة قدرها q
ب ـ dS جزء صغير من السطح المغلق يمكننا من حساب الفيض الكهربي العمودي عليه ثم يعمم على السطح المغلق كاملا «قانون جاوس».

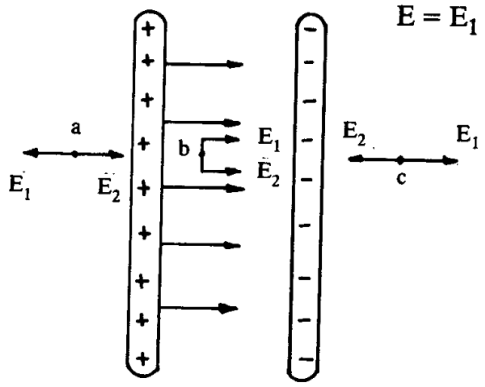
يُفرض أن سطحا صغيرا dS يمثل جزءا من السطح الكلي المحيط بالنقطة q حيث يبعد مسافة r عن q كما في شكل (١٥ب ـ ١). ولتكن n هي متجه الوحدة العمودي على dS و E شدة المجال وحسب المعادلة (٤٨جـ ـ ١) يكون الفيض العمودي خلال المساحة dS هو:

فعند النقطتين a , c مثلا تكون المركبتان E_1 و E_2 متساويتين في المقدار ومتضادين في الاتجاه أي عند كل نقطة من هذه النقط الخارجية يكون $E = 0$.

بينما عند نقطة ما بين الصفيحتين مثل b تكون المحصلة :

$$E = E_1 + E_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (١-٥٦)$$

ولكن من المعادلة (١-٥٥) نجد أن :



$$E_1 = E_2 = \frac{1}{2}\frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

$$\therefore E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \quad \ldots \quad (١-٥٧)$$

شكل (١-٢١) : تابع للتطبيق (١-٩-٥)

أي أن شدة المجال الكهربي عند أي نقطة بين الصفيحتين تعتمد على كثافة الشحنة σ فقط .

والمجال الكهربي بين الصفيحتين هو مجال منتظم (uniform) ولذلك يعرف بأنه ذلك المجال الذي تكون فيه خطوط القوى الكهربية متوازية وعلى أبعاد متساوية من بعضها، أي أن شدة المجال ثابتة في أي مكان داخل المجال مقدارا واتجاها .

(١-٩-٦) المجال والشحنة داخل وخارج موصل

Field and charge within and without a conductor

إذا تعرضت الشحنات الحرة داخل موصل ما لمجال كهربي فإنها ستتحرك وإذا استمر المجال الكهربي بطريقة أو بأخرى داخل الموصل حدثت حركة مستمرة للشحنات الحرة (هذه الحركة تسمى تيارا) أما إذا لم يكن هناك مجال بداخل الموصل فلن تتحرك الشحنات الحرة وهذا يعني أنه إذا كانت الشحنات الحرة بداخل الموصل ساكنة، فإن المجال بداخل الموصل يجب أن يساوي صفرا .

الجهد الكهربي

Electrical Potential

● طاقة الوضع الكهربية الاستاتيكية ● الجهد الكهربي ● العلاقة بين المجال والجهد الكهربي ● الجهد الناتج عن موصل كروي مشحون ● تقاسم الشحنات بين الموصلات ● السطوح متساوية الجهد ● معادلات بواسون ولابلاس ● طاقة الوضع والمجال الكهربي ● ذو قطبين في مجال كهربي خارجي منتظم ● مسائل.

(٢-١) طاقة الوضع الكهربية الاستاتيكية

Electrostatic Potential Energy

من المعروف أنه إذا رفع جسم عن سطح الأرض فإن شغلا سيبذل لرفعه حتى يمكن التغلب على قوة جذب الأرض ويكون الجسم في هذه الحالة قد اكتسب طاقة تعرف بطاقة الوضع (potential energy) التي تتحول إلى طاقة حركة إذا ترك الجسم يسقط حرا نحو الأرض عائدا إلى وضعه الأصلي.

وقياسا على ذلك فإن لكل جسم مشحون موجود في مجال كهربي طاقة كهربية تنتج عن الشغل المبذول واللازم لتحريك الجسم «كفصل شحنتين متجاذبتين وكتقريب شحنتين متنافرتين» في عكس اتجاه القوة الكهربية وهذا الشغل يتحول إلى طاقة حركة لو ترك الجسم المشحون حرا.

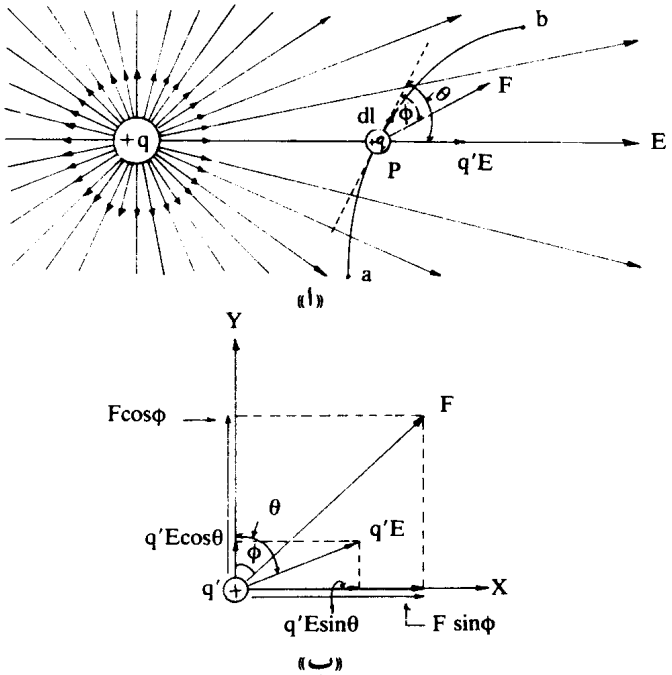
إذا وضعت شحنة موجبة قدرها $+q'$ في مجال كهربي شدته E ، كما في شكل (١-٢)، فإنها سوف تتحرك في اتجاه المجال تحت تأثير قوة كهربية قدرها $q'E$ ولكن إذا أثر على الشحنة بقوة أخرى خارجية F «غير كهربية» فإن الشحنة q' ستتحرك في اتجاه محصلة القوتين F و $q'E$. وحيث إن $q'E$ تختلف من نقطة لأخرى فإن الشحنة ستتخذ المنحنى ab مسارا لها (مثلا). فإذا كانت الزاوية بين $q'E$ والمماس لهذا المنحنى هي θ والزاوية بين F والمماس لها هي ϕ فإنه بتحليل هاتين القوتين في اتجاه عمودي وآخر مواز للمماس، كما هو موضح بشكل (١-٢)، يمكن الحصول على :

أ ـ المحصلة العمودية للقوى (resultant normal forces) :

$$\Sigma F_n = F \sin \phi + q'E \sin \theta \quad \ldots\ldots \quad (١-٢)$$

ب ـ ومحصلة القوى المماسية (resultant tangential forces)

$$\Sigma F_t = F \cos \phi + q'E \cos \theta \quad \ldots\ldots \quad (٢-٢)$$



شكل (١-٢): أ ـ q' وقعت في مجال شدته E ناتج عن الشحنة $+q$ فتأثرت بقوة قدرها $q'E$ ثم خضعت الشحنة q' لقوة أخرى خارجية F فتحركت الشحنة في اتجاه محصلة القوتين فاتخذت المسار ab.

ب ـ تحليل القوتين $q'E$ ، F إلى مركباتهما.

الفصل الثانى

حركة الجسيمات المشحونة
بالمجالات الكهربية والمغناطيسية
وتطبيقات مختلفة عليها

قصة اكتشاف الالكترون

لم يكن لمفهوم الإلكترون أن يظهر لولا اعلان اليساندرو فولتا Allesandro Volta في العشرين من آذار مارس عام 1800 عن اختراعه لعمود فولتا، وهو الصورة البدائية للعمود الجاف (البطارية)، عندما جمع بين معدنين مختلفين، هما الخارصين والفضة، بعد أن فصل بينهما بقطعة من قماش بللها في محلول من ملح، وربط هذا الزوج بمثله ثم بمثله، فلما تسلسلت، أعطت السلسلة تياراً كهربائياً ضعيفاً، تزداد قوته بزيادة طول السلسلة.

أوقد هذا الاختراع شعلة في رأس جونز برزيليوس Jons Berzelius، وأخذ يعمل على امرار الكهرباء القادمة من عمود فولتا خلال محاليل المركبات، وأعلن بعد عامين من اختراع عمود فولتا أن العناصر المعدنية (الأيونات الموجبة من محلول المركب بالمفهوم الحديث) تذهب دائماً الى القطب السالب المربوط بعمود فولتا، بينما العناصر غير المعدنية (الأيونات السالبة من محلول المركب بالمفهوم الحديث) تذهب دائماً الى القطب الموجب.

عام 1806 قام الشاب الإنجليزي همفري دافي Humphry Davy في معمله بصنع بطارية فولتية قوية من النحاس، وفي أكتوبر تشرين أول من ذلك العام أجرى الطاقة الكهربائية التي جاءت من مائة وخمسين عموداً في وعاء يحتوي على البوتاس السائح، وبعد برهه ظهرت كرات من مادة كالفضة على الطرف السالب من سلك البلاتين المتصل بالبطارية، لم تلبث أن اشتعلت من ذات نفسها، ولم يكن هذا العنصر الذي فصله إلا عنصر البوتاسيوم.وبذلك الكشف يكون دافي قد فتح باباً واسعاً للكيميائيين لاستخلاص العناصر.

وفي عام 1834 أبدى العالم الانجليزي مايكل فارادي Michael Faraday اهتماماً بدراسة أثر التيار الكهربائي في محاليل ومصاهير المركبات الكيميائية، وقد بين أن إمرار التيار الكهربائي فيها يحدث تفاعلات كيميائية.

لاحظ فارادي عند إمرار تيار كهربائي خلال مصهور كلوريد النحاس ترسب النحاس على القطب السالب لخلية التحليل، وتصاعد غاز الكلور عند القطب الموجب ، وقد قاده ذلك للإستنتاج بأن جسيماً كهربائياً قد دخل على الأيون الموجب (أيون النحاس) وحوله إلى ذرة متعادلة (ذرة نحاس)، وفي نفس الوقت خرج الجسيم الكهربائي من الأيون السالب (أيون الكلور) وحوله إلى ذرات متعادلة أو جزيئاً متعادلاً (جزيء الكلور). وهذا ما دعاه للاستنتاج بأن الذرات تحتوي على جسيمات سالبة الشحنة.

تزايد اهتمام العلماء في تلك الأثناء كثيراً بفهم طبيعة الكهرباء، وبما أنه من المتعذر رؤية التيار الكهربائي عند مروره خلال سلك، فقد حاول العلماء توليد تيار كهربائي من تلقاء نفسه عن طريق سحب الهواء من أنبوب، ثم امرار التيار خلال الفراغ.

في عام 1855 قام المخترع الألماني هينريش غزلر Heinrich Geissler باختراع مضخة هواء جيدة قادرة على تفريغ الهواء من أنبوب زجاجي، وقد وصل الضغط في الأنبوب الى 1/10000 من الضغط الجوي العادي.

وباختراع هذه المضخة قام العالم يوليوس بلكر J . Plucker عام 1859 بتصميم أول أنبوب تفريغ زجاجي يتصل طرفيه من الداخل بلوحين فلزيين، وتم ربط اللوحين الفلزيين بكل من القطب السالب والقطب الموجب لمصدر عالي الفولتية، وبعد سحب الهواء جزئياً من داخل الأنبوب بوساطة مضخة غزلر المشار اليه سابقا، حدثت مفاجأة طار بلكر لها طرباً، فقد تشكلت حزمة ضوئية خضراء اللون بين اللوحين الفلزين، مما يعني سريان التيار الكهربائي خلال الفراغ، وهو ما كان يحلم به العلماء.

ولتفسير اللغز الذي حير العلماء في تفسير طبيعة الأشعة المهبطية (او اشعة الكاثود) افترض العلماء أن الحزمة الضوئية شكل من أشكال الضوء. ولكن الأشعة المهبطية انحرفت عن مسارها عند تعريضها لمجال مغناطيسي وهذا ما لا يحدث للضوء .

في العام 1869 بين العالم هيتورف Hittorf. W . J أن الحزمة الضوئية تسير في خطوط مستقيمة، عندما لاحظ تكون ظل باتجاه المصعد لحاجز موضوع في مسارها.

وفي عام 1876 أطلق العالم الألماني ايوغن غولدشتاين Eugen Goldstein اسم الأشعة المهبطية على الحزمة الضوئية في أنبوب التفريغ مستفيداً من تجربة هيتورف، لأنها تنطلق من المهبط (القطب السالب) باتجاه المصعد (القطب الموجب).

في عام 1879 لاحظ السير ويليام كروكس Sir William Crookes أنه بالإمكان التحكم بسلوك الأشعة في أنبوب التفريغ بتخفيض الضغط فتتوهج الجدران الداخلية لأنبوب التفريغ.

كما لاحظ كروكس أن استبدال الغاز بالهواء في أنبوب التفريغ يؤدي الى تغيير لون الحزمة الضوئية، أي أن لون الحزمة يعتمد على نوع الغاز الموضوع في أنبوب التفريغ.

كما قام كروكس بالتأثير على مسار الأشعة المهبطية بمجال مغناطيسي فانحرفت مبتعدةً عن القطب الشمالي للمغناطيس.

وفي العام 1895 أيضاً أيضاً قام العالم الفرنسي جين بيرين Jean Perrin بالتأثير على مسار الأشعة المهبطية بمجال كهربائي فانحرفت نحو المجال الكهربائي الموجب. وبذلك أكدت تجربتا كروكس وبيرين على أن الأشعة المهبطية تحمل شحنة سالبة.

خصائص أشعة الكاثود

عـام 1897 أزاح الفيزيـائي الإنجلـيزي ثومسـون J.J. Thomson الغمـوض عن الأشـعة المهبطيـة، فاقترح أن تكون هذه الأشعة عبارة عن جسيمات صغيرة؛ أصغر من الذرة، وذات شحنة سالبة، وقد قـام بتحديد الخصائص الآتية للأشعة المهبطية:

[1] تمتلك طاقة حركية.

[2] لها القدرة على تسخين الأجسام التي تصطدم بها وهذا يعني أن لها طبيعة جسيمية أو مادية.

[3] عند وضع حاجز في مسارها يتكون للحاجز ظل دلالة على سيرها في خطوط مستقيمة.

[4] إذا أثر عليها مجال كهربائي أو مغناطيسي فإنها تنحرف نحو المجـال المـوجب دلالـة على كونهـا سـالبة الشحنة.

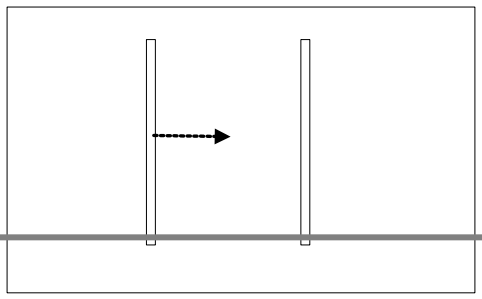
وفيما يلى نقدم بشىء من التفصيل حركـة الالكـترون فى المجـالات الكهربيـة والمغناطسـية وفيها نوضح كيفية تأثير تلك المجالات على تيار الكترونات ومن حيث طبيعيـة الحركـة او الانحراف.

حركة الإلكترون في المجالات الكهربية الإستاتيكية

ندرس فيما يلي ان شاء الله حركة الإلكترون الحر في الفراغ بين أقطاب عليها جهود كهربيـة تسبب في مجالات كهربية. مثل هذه المجـالات تستخدم في الأنـابيب الإلكترونيـة لتنظيم حركـة الإلكترونـات إمـا لتغيير سرعتها وذلك باستخدام مجالات كهربية موازية للحركة الإلكترونيـة وإمـا لتغيـير اتجاههـا وذلـك باستخدام مجالات كهربية عمودية علي اتجاه حركة الإلكترونات الحرة في الفراغ فيما يعرف بالعدسـات المغناطيسية التي تستخدم في تجميع أو تفريق الأشعة الإلكترونية.

1-2-1 اتجاه حركة الإلكترونات موازيا لاتجاه المجال الكهربي المؤثر:

الحالة الأولي: مجال كهربي منتظم وسرعة الإلكترون الابتدائية تساوي صفراً.



الشكل السابق يوضح لوحين متوازيين بينهما المسافة (d) وفرق الجهد بينهما (V). هناك إلكترون عند القطب السالب شحنته (e) كولوم ويبدأ حركته تحت تأثير المجال من السكون أي أن سرعته الابتدائية تساوي صفراً. والمطلوب هو دراسة حركة هذا الإلكترون تحت تأثير المجال الكهربي أي تعيين كل من:

1- عجلة الحركة للإلكترون.

2- المسافة التي يقطعها الإلكترون عند زمن (t).

3- سرعة الإلكترون عند زمن (t).

4- السرعة النهائية للإلكترون قبل اصطدامه باللوح الموجب.

5- زمن العبور (t_d).

نتيجة لفرق الجهد بين الوحين يتولد مجال كهربي منتظم من العلاقة:

$$E = \frac{v}{d} \qquad volt/m \qquad (1)$$

وتحت تأثير قوة المجال (eE) سوف يتحرك الإلكترون في الأتجاه (X) مكتسباً عجلة مقدارها (a) تعطي من العلاقة الأتية

$$F = ma = eE$$

$$\therefore a = \frac{e}{m}.\frac{V}{d} \qquad m/\sec^2 \qquad (2)$$

ولحساب سرعة الإلكترون بعد زمن (t) تستخدم العلاقة :

$$v = v_0 + at$$

$$\therefore v = at \qquad (where \quad v_0 = zero)$$

$$\therefore v = \frac{e}{m}.\frac{V}{d}t \qquad (3)$$

ولحساب المسافة التي يقطعها الإلكترون بعد زمن (t)

$$X = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$\therefore X = \frac{1}{2} a t^2 \qquad (where \quad v_0 = zero)$$

$$\therefore X = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} t^2 \qquad (4)$$

ومن المعادلة (4)

$$t^2 = \frac{2 \times md}{eV} \qquad (5)$$

$$\therefore t = \sqrt{\frac{2 \times md}{eV}} \qquad (6)$$

وبالتعويض من (6) في (3)

$$\therefore v = \frac{e}{m} \cdot \frac{V}{d} \sqrt{\frac{2 \times md}{eV}} \qquad (7)$$

Or

$$v = \sqrt{\frac{e^2}{m^2} \cdot \frac{V^2}{d^2} \frac{2 \times md}{eV}} \qquad (8)$$

$$= \sqrt{\frac{2e}{m} \cdot \frac{V}{d} X} \qquad (9)$$

وبالتعويض عن قيمة $\frac{e}{m}$

$$\therefore v = 5.93 \times 10^5 \sqrt{\frac{V}{d} X} \qquad m/\sec \qquad (10)$$

$$= 5.93 \times 10^5 \sqrt{E X} \qquad (11)$$

ولحساب سرعة الإلكترون النهائية v_F قبل اصطدامه مباشرة باللوح الموجب أي بعد أن يقطع مسافة (d) يعوض عن (X) في المعادلة (10) بـ (d)

$$\therefore v_F = 5.93 \times 10^5 \sqrt{\frac{V}{d} d}$$

$$\therefore v_F = 5.93 \times 10^5 \sqrt{V} \qquad m/\sec \qquad (12)$$

وأخيرا لحساب زمن العبور (t_d) وهو الزمن الذي يستغرقه الإلكترون ليقطع المسافة بين اللوحين تستخدم المعادلة التالية:

$$t_d = \frac{\text{المسافة بين اللوحين}}{\text{السرعة المتوسطة}}$$

$$t_d = \frac{d}{\frac{v_0 + v_F}{2}} = \frac{2d}{v_F} \qquad (13)$$

لأن السرعة الأبتدائية للإلكترون تساوي صفراً.

الحالة الثانية: المجال الكهربي منتظم والسرعة الابتدائية لا تساوي صفرا

التغيير الوحيد في هذه الحالة هو أننا نأخذ في الاعتبار قيمة v_0 لسرعة الإليكترون الابتدائية، ومن ثم فإن حساب الكميات الفيزيائية السابقة يتم وفقاً للمعادلات التالية :

العجلة التي يتحرك بها الإلكترون هي :

$$a = \frac{eE}{m} = \frac{e}{m}.\frac{V}{d} \quad m/\sec^2 \qquad (14)$$

سرعة الإلكترون عند أية لحظة (t) هي

$$v = v_0 + at$$

$$v = v_0 + \frac{e}{m}\frac{V}{d}t \qquad m/\sec \qquad (15)$$

المسافة التي يقطعها الإلكترون عند زمن (t)

$$X = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

$$X = v_0 t + \frac{1}{2}\frac{e}{m}.\frac{V}{d}t^2 \qquad (16)$$

سرعة الإلكترون عند أي بعد (x) من اللوح السالب لتعطي من العلاقة .

$$v^2 = v_0^2 + 2ax$$

$$v^2 = v_0^2 + 2\frac{e}{m}\frac{V}{d}x \qquad (17)$$

وبالتعويض عن (x) بالمقدار (d) وأخذ جذري الطرفين نحصل علي سرعة الإلكترون النهائية قبل اصطدامه باللوح الموجب

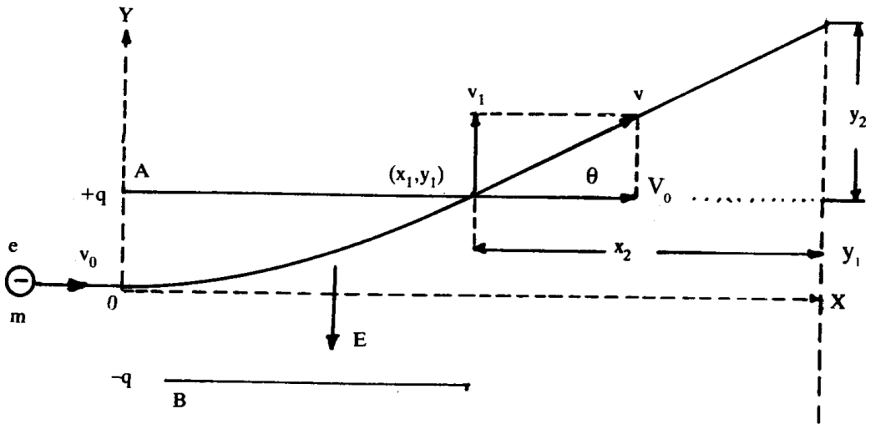
$$v_f = \sqrt{v_o^2 + \frac{2e}{m}V} \qquad (18)$$

زمن العبور بين اللوحين (t_d) ليعطى من العلاقة

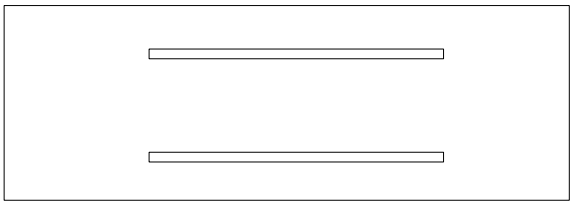
$$t_d = \frac{d}{\frac{V_0 + V_F}{2}} = \frac{2d}{V_0 + V_F} \qquad (19)$$

2-2-1حركة الإلكترون في اتجاه عمودي علي مجال كهربي منتظم:

الشكل التالى يبين مجال كهربي (E) ينشأ نتيجة لوجود فرق في الجهد بين لوحين متوازيين المسافة بينهما (d) وطول كل منهما (L) . وبفرض أن هناك إلكترون يتحرك بسرعة ابتدائية مقدارها (V_0) في أتجاه عمودي علي أتجاه المجال. والمجال الكهربي الناشئ عن وجود فرق الجهد يتعين من المعادلة:



شكل (٢٦-١): حزمة من الالكترونات تسقط في مجال منتظم عمودي على اتجاه الحزمة



$$E = \frac{V}{d}$$

وفي اتجاه المحور الرأس Y وهذا المجال يؤثر علي حركة الإلكترون بقوة عمودية تسبب إزاحته عن مساره في الأتجاه الافقي (X) إلي الأتجاه الراسي (Y) وتكون العجلة التي يكتسبها الإلكترون في اتجاه المحور الرأسي تعطي من المعادلة:

$$a_y = \frac{F}{m} = \frac{e.E}{m} \quad = \frac{e}{m}.\frac{V}{d} \qquad (20)$$

وتسبب إزاحته في الأتجاه (Y) بالمسافة (y) وكذلك تعطيه سرعة مقدارها يمكن حسابه وفقا للمعادلة التالية:

$$v_y = v_{oy} + a_y t = a_y t \qquad (21)$$

حيث سرعة الإلكترون الأبتدائية في الأتجاه الراسي = صفراً.

اما الازاحة فى الاتجاه الراسي تعطي وفقا للمعادلة التالية:

$$y = v_{oy} + \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{1}{2} a_y t^2 \qquad (22)$$

هذا عن حركة الإلكترون في الأتجاه Y أما عن حركته في الأتجاه X فهي ثابتة أي أن سرعته الأبتدائية في الأتجاه X لا تتغير لعدم وجود قوي كهربائية في هذا الأتجاه. ومن ثم فإن الإزاحة في الأتجاه X في زمن معين تعطي من العلاقة :

$$x = v_{ox} t \qquad (23)$$

$$\therefore t = \frac{x}{v_{ox}} \qquad (24)$$

وبالتعويض عن قيمة (t) من المعادلة (24) في المعادلة (22) نحصل علي:

$$y = \frac{1}{2} a_y \left(\frac{x^2}{v_{ox}^2} \right) = \frac{1}{2} \frac{a_y}{v_{ox}^2} x^2 \qquad (25)$$

وهذه معادلة قطع مكافئ أي أن مسار الإلكترون بين اللوحين نتيجة للتأثير عليه بمجال كهربي عمودي علي اتجاه حركته يأخذ شكل القطع المكافئ. والزاوية (θ) والتي ينحرف بها تيار الإلكترونات عن مساره تعطي من تفاضل طرفي المعادلة (25) بالنسبة لـ (x)

$$\because \tan\theta = \frac{dy}{dx}$$

$$= \frac{a_y}{2v_{ox}^{\,2}} . 2x$$

$$= \frac{e\,V}{2\,m\,d} . \frac{2x}{2v_{ox}^{\,2}} \qquad (26)$$

$$= \frac{2\,y}{x} \qquad (26)$$

والزاوية θ_t التي ينحرف بها تيار الإلكترونات عن مساره لحظة خروجه من تأثير المجال الكهربي أي بعد أن يقطع المسافة (L) تعطي بالتعويض عن (x) بالمقدار (L) في المعادلة (26) أي

$$\because \tan\theta_t = \frac{e\,V}{2\,m\,d} . \frac{2L}{2v_{ox}^{\,2}} = \frac{2\,y}{L} \qquad (27)$$

حركة الإلكترون في المجالات المغناطيسية

نفرض أن هناك تيار من الإلكترونات يتحرك بسرعة (v) في أتجاه معين تحت تأثير مجال مغناطيسي (B) والزمن الذي يمضي بين تتابع إلكترون وآخر في هذا الأتجاه هو (dt) .

$$\therefore ds = \upsilon\, dt \qquad (1)$$

وحيثُ أن التيار الكهربي (I) في اتجاه الحركة (اتجاه المحور الأفقي X) يمكن أن يعطي من العلاقة :

$$\mathrm{I} = \frac{e}{dt} \qquad (2)$$

وطبقاً لقاعدة "لابلاس" نجد أن القوة المؤثرة علي التيار (F) الذي يمر في عنصر طول من السلك (ds) يعطي من المعادلة

$$F = \mathrm{I}.\mathrm{B}.ds\sin\theta \qquad (3)$$

حيثُ (θ) هي الزاوية المحصورة بين اتجاه المجال واتجاه التيار. وبالتعويض عن dt ، I من المعادلتين (1) ، (2)

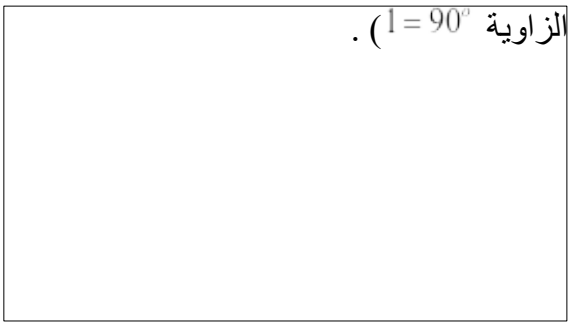
$$\therefore F = e\upsilon\,\mathrm{B}\sin\theta \qquad (4)$$

أولاً: إذا كان الإلكترون متحركاً في مجال مغناطيسي عمودي علي مستوي الصفحة فإن اتجاه القوة المؤثرة عليه يكون في مستوى الصفحة عمودياً علي كل من υ , B كما فى الشكلين التاليين.

ويكون مقدار هذه القوة في هذه الحالة

$$F = e\upsilon B$$

(لأن جيب الزاوية $\sin 90^\circ = 1$) .



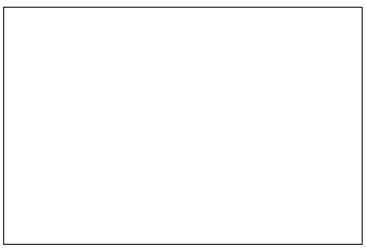
وتحت تأثير كتلة الإلكترون والقوة المغناطيسية المؤثرة عليه ينحرف الإلكترون في مسار منحنى نصف قطره (r) بحيث يكون تحت تأثير القوة (F) والقوة الطاردة المركزية $\frac{mv^2}{r}$ أي أن:

$$e\upsilon B = \frac{m\upsilon^2}{r} \qquad (5)$$

$$\therefore r = \frac{m}{e}.\frac{v}{B} \qquad (6)$$

وإذا كانت السرعة التي يتحرك بها الإلكترون ثابتة فإن المسار الذي يرسمه الإلكترون يكون دائرياً في مستوى عمودي علي المجال المغناطيسي (B)

ثانياً: في حالة ما يكون اتجاه السرعة يعمل زاوية θ مع المجال فإنه يمكن تحليل هذه السرعة لمركبتين إحداهما في اتجاه المجال والأخرى موازية له كما بالشكل التالى:



أ- بالنسبة للمركبة الأولي للسرعة والتي في اتجاه المجال (v_2 كما بالشكل) فإنها لا تعاني من أي تغيير لأنه لا توجد قوة تؤثر علي الإلكترون في هذا المجال حيثُ أن θ تساوي صفراً وبالتالي $\sin\theta$ يساوي صفراً أيضاً، ومن المعادلة (4)تصبح القوة في هذا الأتجاه تساوي أيضاً صفراً. وهذا يعني فيزيائياً أن الإلكترون يقطع في هذا الاتجاه (اتجاه المجال) مسافات متساوية في أزمنة متساوية.

ب- أما المركبة الثانية للسرعة العمودية علي اتجاه المجال (v_1 كما بالشكل) فإنها سوف تتأثر بالقوة (F) وتغير اتجاهها بالتالي لتسيرفي مسار منحنى كما سبق الإشارة إليه المعادلة (6) والذي سيصبح دائري في حالة ثبات (υ).

ومعني هذا أن الإلكترون يتحرك في مسار بريمي محوره يوازي اتجاه المجال الشكل التالي. وإذا كانت θ هي الزاوية بين اتجاه المجال (B) واتجاه حركة الإلكترون فإن:

$$e\upsilon B\sin\theta = \frac{m\upsilon^2}{r} \qquad (7)$$

$$\therefore r = \frac{mv}{eB\sin\theta} \qquad (8)$$

وإذا كان كل من (υ) ، (B) ثابتة فإن الخط البريمي الذي يمثل حركة الإلكترون يكون نصف قطر مسقطه العمودي علي اتجاه المجال (B) ممثلاً بالمعادلة

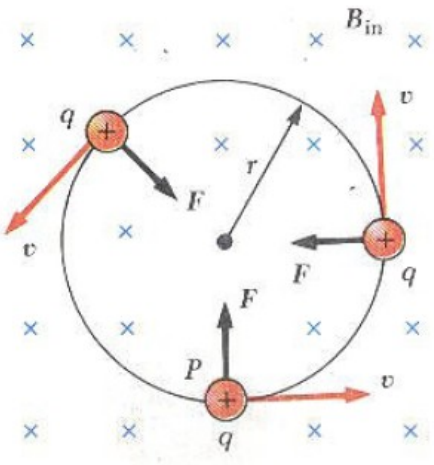
$$r' = r\sin^2\theta \qquad (9)$$

$$r' = \frac{m\upsilon^2\sin^2\theta}{eB\sin\theta} = \frac{m\upsilon\sin\theta}{eB} \qquad (10)$$

وإذا لم يكن المجال نفسه منتظماً فإن مسار الإلكترون في هذه الحالة يكون علي شكل خط "بريمي" متغير الأتساع محوره يوازي اتجاه المجال.

تأثير المجال المغناطيسي على حركة جسيم مشحون

The Effect of magnetic field on moving charged particle



درسنا في المحاضرة الأولى ان القوة المغناطيسية المؤثرة على جسم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي تكون دائماً عمودية على على سرعة الجسم. وهذا يعني أن الشغل المبذول بواسطة القوة المغناطيسية يساوي صفر وبالتالي فإن تأثير المجال المغناطيسي على حركة جسم مشحون هو تغير اتجاهه بحيث يسلك الجسم المشحون في مجال مغناطيسي مساراً دائرياً يكون مستوى هذا المسار الدائري عمودياً على المجال المغناطيسي.

بتطبيق قانون نيوتن لجسم يتحرك في مسار دائري لإيجاد القوة المؤثرة ومساواتها بالقوة المغناطيسية نجد أن نصف قطر المسار يعطى بالعلاقة التالية:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$r == \frac{mv}{qB}$$

وهذا يعني ان نصف قطر المسار الذي يسلكه الجسم المشحون في مجال مغناطيسي يتناسب طرديا مع كتلة

وسرعة الجسم وعكسيا مع الشحنة وقيمة المجال المغناطيسي.

وتعطى قيمة التردد الزاوي **Angular frequency** والزمن الدوري **Period** للجسم المشحون بـــ

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

يعرف التردد الزاوي في العديد من التطبيقات بـــ **Cyclotron frequency**.

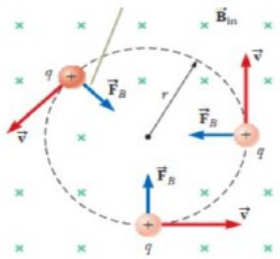
أي أن التردد الزاوي **Angular frequency** والزمن الدوري **Period** للجسم المشحون لا يعتمدان على السرعة أو نصف القطر.

8 -حركة جسيم مشحون في مجال مغناطيسي Motion of a charged particle in a magnetic field

اذا وضع جسيم مشحون بشحنة موجبة+(q(في مجال مغناطيسي منتظم وكانت سرعته $\vec{}$ في اتجاه عمودي على المجال، فانه سيتأثر بقوة مقدارها :

$$F=qVB\sin\Theta \qquad (1)$$

ويكون اتجاهها الى اعلى طبقا لقاعدة اليد اليمنى. ولما كانت القوه عمودية على السرعة فإنها لا تغير من مقدار هذه السرعة ولكنها تغير من اتجاهها فيتغير موضع الجسيم واتجاه القوة المؤثرة عليه بينما تظل مقادير الكميات q ، v، B ثابتة.



الشكل يوضح مسار جسيم مشحون في مجال مغناطيسيB منتظم من الرسم يتبين انه عندما تكون سرعة الجسيم $\vec{V}$ عمودية على المجال المغناطيسي

المنتظم فان الجسيم يتحرك في مسار دائري في مستوى عمودي علىB

المنتظم فان الجسيم يتحرك في مسار دائري في مستوى عمودي علىB

هكذا فان الجسيم يتحرك بتأثير قوة ثابتة المقدار مقدارها qvB وتتجه دائما في الاتجاه العمودي على .$\vec{V}$ ولذا فان مسار هذا الجسيم يكون على شكل دائرة نصف قطرها r كما في الشكل اعلاه (اذا كان الجسيم موجب+ q) فان اتجاه الدوران يكون باتجاه معاكس لعقارب الساعة كما في الحالة اعلاه وفي حالة الشحنة السالبة- q (فان الدوران سيكون باتجاه عقارب الساعة(. ونتيجة لهذه

الحركة الدورانية تخضع الشحنة q لقوتين متعاكستين احدهما القوة المغناطيسية F_B متجهه الى مركز الدوران، والاخرى قوة طرد مركزية F مقدارها حسب قانون نيوتن الثاني:

$$F = ma = \frac{mv^2}{r} \qquad (2)$$

وتبقى الشحنة متحركة في مسارها الدائري اذا تساوت F_B , F ولذلك يُحصل من المعادلتين اعلاه على

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \qquad (3)$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

وهذا يعني ان نصف قطر المسار الذي يسلكه الجسيم المشحون في مجال مغناطيسي يتناسب طرديا مع كتلة وسرعة الجسيم وعكسيا مع الشحنة وقيمة المجال المغناطيسي.

اما السرعة الزاوية(speed Angular) للجسيم فتعطى كالتي:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \qquad (4)$$

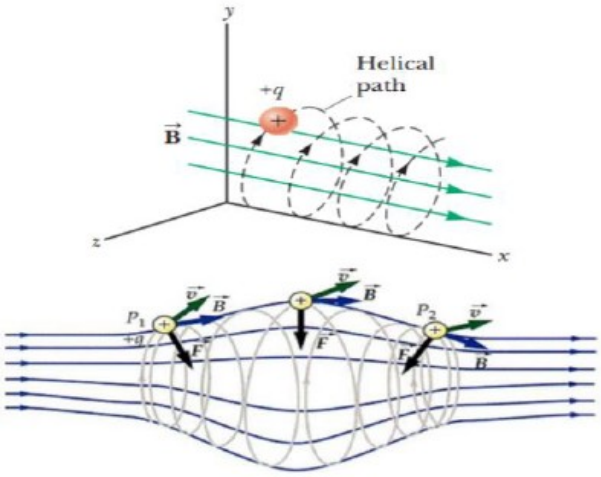
حيث m كتلة الجسيم و ω سرعته الزاوية، في بعض الاحيان تسمى السرعة الزاوية بتردد السيكلوترون (frequency Cyclotron)لان الجسيم المشحون يدور عند هذا التردد الزاوي بتأثير نوع من المعجلات يسمى بالسيكلوترون .وبمعرفة السرعة الزاوية يمكن حساب تردد الجسيمf

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m} \qquad (5)$$

ومن المعادلتين الاخيره نستنتج ان السرعة الزاوية والتردد للجسيم ال يعتمدان على السرعة أو نصف القطر

اما اذا كان اتجاه السرعه غير متعامد على اتجاه المجالBيصنع زاويةΦ فهذا سيؤدي الى دوران الشحنة في مسار حلزوني(path Helical محوره متفق مع اتجاه المجال، كما في الشكل ادناه وفيه يكون اتجاه المجالBباتجاه الاحداثي x حيث لا توجد مركبة للقوه، ولهذا لاتوجد مركبة للتعجيل موازية للمجال B ومركبة السرعة الموازية للمجال تبقى ثابتة، وفي كل الاحوال تبقى القوة المغناطيسية المؤثرة على الجسيم عمودية على اتجاه المجال ويكون نصف قطر مقطع الحلزون:

$$r = \frac{mv}{qB} sin\Phi \qquad (6)$$



الشكل يوضح جسيم مشحون يمتلك متجه سرعة لها مركبة موازية للمجال المغناطيسي المنتظم وتتحرك في مسار حلزوني

تطبيقات على استخدامات المجالات الكهربية والمغناطيسية

كيف تعمل الأجهزة المعتمدة على حركة جسيمات مشحونة في مجال كهربي ومغناطيسي

تلعب قوانين الكهربية والمغناطيسية دورا أساسيا في تشغيل معظم الأجهزة التي نستخدمها في حياتنا مثل أجهزة التلفزيون والمسجل والفيديو والكمبيوتر والجوال ومعجلات الطاقة الضخمة والكثير من الأجهزة الالكترونية المختلفة. كما ان القوى المتبادلة بين الذرات والجزيئات المسؤولة عن تشكل المواد الصلبة والسائلة والغازية هي قوى كهربية في الأساس.

الأدلة التي وجدت في بعض الوثائق الصينية تقترح ان المغناطيسية اكتشفت مبكرا جدا وقدرت في 2000 قبل الميلاد. ولاحظ اليونانيون بعض الظواهر الكهربية والمغناطيسية منذ 700 سنة قبل الميلاد. عرف اليونانيون القوى المغناطيسية من الحجر الطبيعي الذي عرف باسم المغنتيت أي أكسيد الحديد الأسود (Fe_3O_4) ينجذب نحو الحديد. (كلمة كهربية electric جاءت من كلمةالكترون elecktron وهي الترجمة اليونانية لكلمة امبر amber. وكلمة مغناطيسية magnetic جاءت من ماغنيسيا Magnesia وهو اسم المنطقة التي اكتشف فيها الحجر المغناطيسي في اليونان).

لم يعرف العلماء ان الكهربية والمغناطيسية هما عبارة عن ظاهرتين مرتبطتين معا حتى مطلع القرن التاسع عشر. في العام 1819 تمكن العالم هانس اورستد Hans Oersted من اكتشاف ان ابرة البوصلة المغناطيسية تنحرف عندما توضع بجوار دائرة يمر بها تيارا كهربيا. في العام 1831 اكتشف كلا من العالم مايكل فارادي Michael Faraday وفي نفس الوقت أيضا العالم جوزيف هنري Joseph Henry ان سلك يتحرك بالقرب من مغناطيس او عندما يتحرك مغناطيس بجوار سلك فان تيارا كهربيا يتولد في السلك. **سوف نتعرف على اهم التطبيقات المعتمدة على حركة جسيمات مشحونة في مجال مغناطيسي وهي (1) مرشح السرعة Velocity Selector و(2) مطياف الكتلة Mass Spectrometer و(3) المعجل الدوراني السيكلترون Cyclotron**

اساسيات هامة قبل ان نبدأ

عندما شحنة تتحرك بسرعة v في وجود كلا من مجال كهربي **E** ومجال مغناطيسي B تتعرض لقوة كهربية **qE** وقوة مغناطيسية **qvxB**. القوة الكلية (تعرف باسم قوة لورنتز Lorentz force) المؤثرة على الشحنة هي

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

لاحظ ان الرموز المكتوبة باحرف **سميكة Bold** تعبر عن كميات متجهة>

الفروقات الأساسية بين القوة الكهربية والمغناطيسية

1. متجه القوة الكهربية يكون في اتجاه خطوط المجال الكهربي، بينما متجه القوة المغناطيسية يكون عموديا على المجال المغناطيسي.
2. تؤثر القوة الكهربية على الجسيم المشحون بغض النظر اذا كان الجسيم ساكنا او متحركا، بينما القوة المغناطيسية تؤثر على الجسيم المشحون فقط عندما يكون متحركا.
3. تبذل القوة الكهربية شغلا في إزاحة الجسيم المشحون، بينما القوة المغناطيسية المرتبطة مع مجال مغناطيسي مستقر لا تبذل شغلا عندما يتحرك الجسيم لان القوة المغناطيسية عمودية على اتجاه الازاحة.

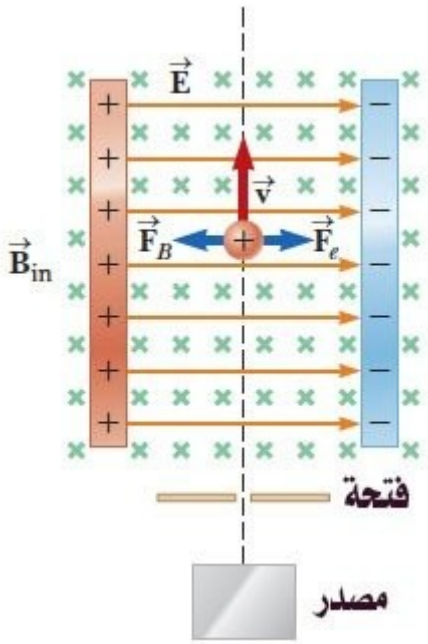
من الجملة الأخيرة ومن نظرية الطاقة الحركية والشغل، نستنتج ان الطاقة الحركية للجسيم المشحون المتحرك خلال مجالا مغناطيسيا لا يمكن ان يتغير بواسطة المجال المغناطيسي فقط. يغير المجال اتجاه متجه السرعة ولكن لا يغير سرعة او طاقة حركة الجسيم.

ومن هذه المبادئ الأساسية يمكننا ان نبدأ في توضيح بعض التطبيقات العملية الهامة وهي على النحو التالي:

(1) مرشح السرعة Velocity Selector

في العديد من التجارب التي تشتمل على حركة جسيمات مشحونة، فانه من المهم ان تكون هذه الجسيمات تمتلك نفس السرعة، هذا يمكن ان يتحقق بتطبيق مجال كهربي ومجال مغناطيسي في الاتجاهات الموضحة في الشكل 1. يوجه مجال كهربي منتظم إلى اليمين كما هو موضح في الشكل 1)، وبتطبيق مجال مغناطيسي منتظم في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي (داخل على الصفحة في الشكل 1). اذا كانت q موجبة والسرعة v إلى الأعلى، فان اتجاه القوة المغناطيسية **qvxB** سوف يكون إلى اليسار واتجاه القوة الكهربية **qE** سيكون إلى اليمين. عندما يتم اختيار كلا من مقدار المجال الكهربي ومقدار المجال المغناطيسي بحيث يجعل كلا من القوة الكهربية مساوية للقوة المغناطيسية أي ان qE = qvB، فانه يمكن اعتبار ان الجسيم المشحون كجسيم في حالة اتزان ويتحرك في خط رأسي مستقيم خلال منطقة المجالين. من الصيغة qE = qvB، ومنها نحصل على

$$v = \frac{E}{B} \qquad (1)$$



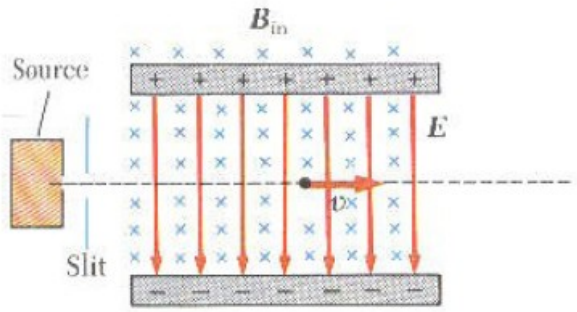
الشكل 1 مرشح السرعة. يتحرك جسيم موجب الشحنة بسرعة v في وجود مجال مغناطيسي في اتجاه الدخول على الصفحة ومجال كهربي متجها إلى اليمين، فانه يتعرض إلى قوة كهربية qE إلى اليمين وقوة مغناطيسية qvxB متجها إلى اليسار.

نلاحظ هنا ان الجسيمات التي تمتلك هذه السرعة فقط هي التي تمر بدون انحراف من خلال المجالين المتعامدين الكهربي والمغناطيسي. القوة المغناطيسية المبذولة على جسيمات متحركة بسرعات اعلى من ذلك تكون اعلى من القوة الكهربية، والجسيمات في هذه الحالة تنحرف إلى اليسار. اما الجسيمات المتحركة بسرعة اقل من تلك السرعة تنحرف إلى اليمين. وبهذه الطريقة نحصل على شعاع من الجسيمات التي تتحرك بسرعة واحدة هي v ويمكن تغير قيمة هذه السرعة بالتحكم في شدة المجال الكهربي والمجال المغناطيسي.

المشحونة ذات سرعة محددة. وذلك لأنه كما نعلم ان الجسيمات المنبعثة عند اية درجة حرارة لها توزيع احصائي على نطاق واسع من السرعات ولاختيار سرعة محددة نستخدم جهاز مرشح السرعة **Velocity selector**.

فكرة العمل

يتكون جهاز مرشح السرعة من مصدر للجسيمات المشحونة **Source** تنطلق الجسيمات من المصدر بسرعات مختلفة لتمر من الشريحة التي تحدد حزمة من هذه الجسيمات لتمر في منطقة مجال كهربي متعامد مع مجال مغناطيسي كما في الشكل التالي:



تتأثر الجسيمات المشحونة بالمجالين الكهربي والمغناطيسي بحيث يكون اتجاه القوة الكهربية للأسفل واتجاه القوة المغناطيسية للأعلى. وهذا سيؤدي إلى ان الجسيمات المتحركة بسرعة معينة هي التي ستتحرك في خط مستقيم لأن عند تلك السرعة تتساوى القوة الكهربية مع القوة المغناطيسية بينما الجسيمات المتحركة بسرعات اخرى ستنحرف عن المسار المستقيم لتصطدم بحائل يمنع مرورها من الفتحة الموجودة على محور الجهاز.
ولإيجاد هذه السرعة نستخدم قانون لورنتز.

$$q\,E = q\,v \times B$$

$$v = E/B$$

أي ان بتغيير قيمة احد المجالين يمكن اختيار الجسيمات المشحونة بالسرعة المطلوبة ولهذا يسمى الجهاز بمرشح السرعة.

The Mass Spectrometer

جهاز مطياف الكتلة Mass spectrometer هو جهاز يستخدم لفصل الذرات أو الجزيئات أو الأيونات بناءً على نسبة كتلتها إلى شحنتها.

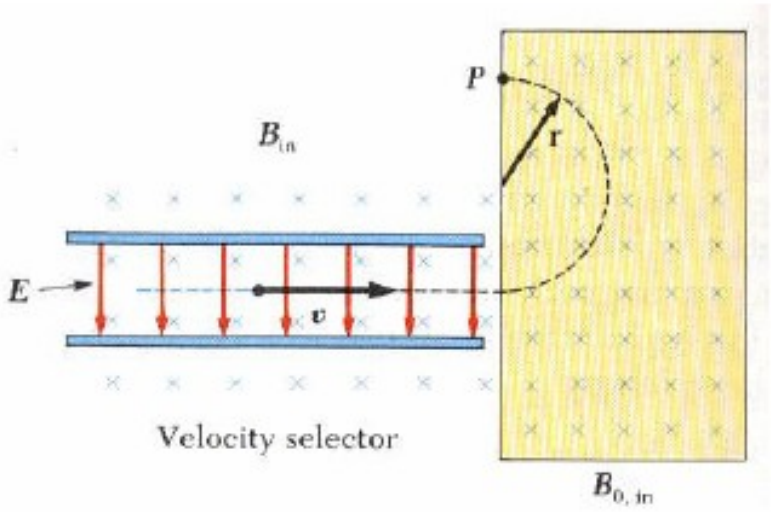
فكرة العمل

نعتمد فكرة عمل مطياف الكتلة اساسا على استخدام جهاز مرشح السرعة لاختيار وتحديد سرعة الاجسام المختلفة المراد فصلها.

يوضح الشكل ادناه فكرة عمل الجهاز حيث يمرر شعاع من الايونات في مرشح السرعة لنخرج جسيمات ذات سرعة تساوي E/B. تمر هذه الايونات إلى مطياف الكتلة المكون من مجال مغناطيسي منتظم B_o تسلك الجسيمات خلال المجال المغناطيسي مسار دائري نصف قطره r لتصطدم بشاشة فوتوغرافية تعطي ومضة تشير إلى موقع اصطدام الايون مع الشاشة نتيجة للمجال المغناطيسي المطبق في جهاز مطياف الكتلة.

من المحاضرة السابقة وجدنا ان r تعطى بالعلاقة التالية:

$$r = \frac{mv}{qB}$$



اذا النسبة بين الكتلة إلى الشحنة تكون

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

بالتعويض عن السرعة v بمعادلة مرشح السرعة نجد أن

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E}$$

وبهذه الطريقة يمكن ايجاد النسبة بين الكتلة إلى الشحنة عن طريق قياس نصف قطر دوران الجسم المشحون في مطياف الكتلة. وقيم المجال الكهربي والمغناطيسي لمرشح السرعة والمجال المغناطيسي المستخدم في المطياف.

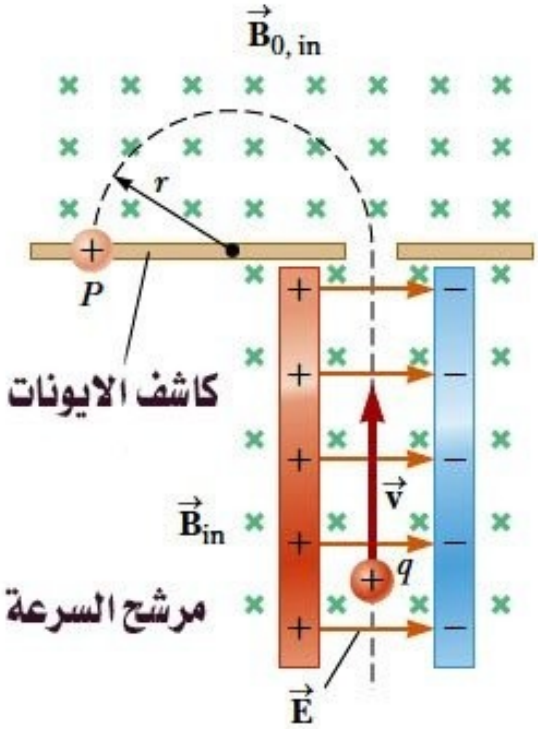
يعمل مطياف الكتلة على فصل الايونات حسب نسبة كتلتها إلى شحنتها. في جهاز مطياف الكتلة يمر شعاع من الايونات من مرشح السرعة أولا لنحصل على جسيمات لها نفس السرعة v ومن ثم تدخل هذه الجسيمات في مجال مغناطيسي منتظم **B** ٍ له نفس اتجاه المجال المغناطيسي في مرشح السرعة كما هو موضح في الشكل 2. مع دخول المجال المغناطيسي الثاني، تتحرك الايونات في نصف دائرة نصف قطرها r قبل ان تصل إلى كاشف عند P. اذا كانت الايونات موجبة الشحنة فان الشعاع ينحرف إلى اليسار كما هو موضح في الشكل 2. اما اذا كانت الايونات سالبة الشحنة فان الشعاع ينحرف إلى اليمين.
من المعادلة 3.1 يمكن ان نعبر عن النسبة m/q على النحو التالي:

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v}$$

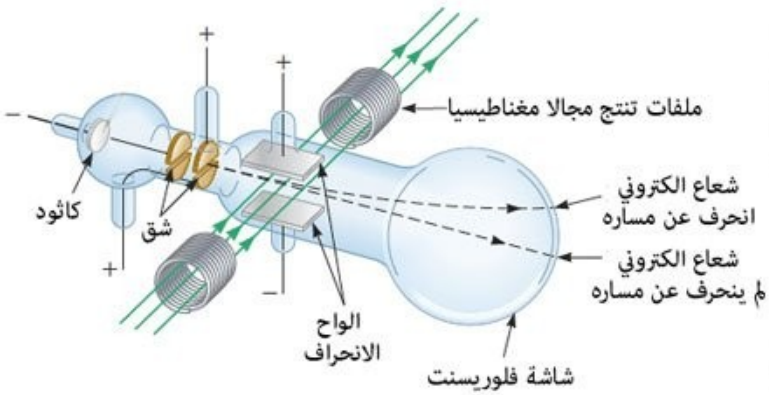
باستخدام المعادلة 1 نحصل على

$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0B}{E}$$

لهذا، يمكن حساب النسبة m/q بقياس نصف قطر التحدب وبمعرفة كلا من B وB_0 وE. عمليا يتم قياس الكتل للعديد من نظائر الايونات، بايونات تحمل نفس الشحنة q. بهذه الطريقة يمكن تحديد نسب الكتل حتى لو كانت q مجهولة.
قام العالم طومسون Thomson (1856 – 1940) في العام 1897 لقياس نسبة e/m_e للالكترونات. يوضح الشكل 3 a الأدوات التي استخدمها طومسون. تعجل الالكترونات من الكاثود وتمر خلال شقين. تنجرف الالكترونات في منطقة يكون فيها المجال الكهربي والمجال المغناطيسي متعامدين. يتم في البداية ضبط مقدار المجالين للحصول على شعاع غير منحرف يسجل على شاشة فلوريسنت. من حجم الانحراف والقيم المقاسة E و B، يمكن تحديد نسبة الشحنة إلى الكتلة.النتائج التي تم الحصول عليها من هذه التجربة تمثل اكتشاف الالكترون كجسيم أولي.



الشكل 2 مطياف الكتلة. ترسل جسيمات مشحونة بشحنة موجبة في البداية من خلال مرشح السرعة ومن ثم تدخل منطقة يتسبب فيها مجال مغناطيسي B_o إلى حركة الجسيمات في مسار نصف دائري وتصطدم بالكاشف عند النقطة P.



مطياف الكتلة Mass spectrometry

مطياف الكتلة هو جهاز اخترعه فرانسيس أستون ويعتمد مبدأ عمله على أن الجسيمات المشحونة عندما تدخل مجالا مغناطيسيا منتظما، بحيث يعامد

اتجاهه اتجاه حركتها، فإنها تأخذ مسارات دائرية تتناسب أنصاف أقطارها مع كتلة الجسيم المشحون. ويمكن بواسطة هذا الجهاز قياس نسبة الكتلة للشحنة وفصل الجسيمات المختلفة بهذا المقدار عن بعضها سواء كانت ذرات أو أيونات أو جزيئات. و هو يسمح بقياس q/m لذرة متأينة (حيث m كتلة الايون و q شحنته) وبتحديد كتلة الذرة، وقد لعبت المطيافية دورا كبيرا في دراسة النظائر.

يتكون المطياف من :

1. منبع أيونات Ion source
2. محلل الكتلة Mass Analyzer
3. كاشف Detector

حيث منبع الأيونات يشطر جزيئات العينة إلى أيونات. وجهاز التحليل يفرز الأيونات بحسب كتلتها عن طريق تطبيق حقول كهرومغناطيسية. ومكشاف لقياس قيمة مؤشر الكمية وبذلك تعطي بيانات لحساب وفرة الأيونات الملتقطة.

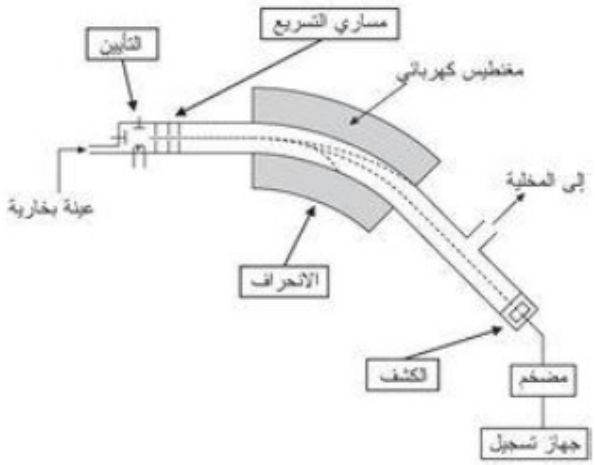
ولمطياف الكتلة استخدامات كمية ونوعية، تشمل تحديد هوية المركبات المجهولة، وتحديد التركيب النظائري للعناصر في الجزيء، وتحديد بنية المركب بمراقبة شظاياه. كما يستخدم في تحديد كمية مركب ما في العينة أو لدراسة كيمياء الأيونات في الطور الغازي (كيمياء الأيونات والجسيمات الحيادية في الفراغ). يستخدم مطياف الكتلة حاليا في مخابر التحليل التي تدرس الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية لطيف واسع من المركبات.

ويعتمد عمل مطياف الكتلة على قذف للمركب العضوي في حالته الغازية أو البخارية بسيل من الالكترونات السريعة والعالية الطاقة (طاقتها في حدود 70 الكترون فولت) تحت هذه الظروف يؤدي اصطدام الجزيئات بهذه الالكترونات السريعة إلى انفصال إلكترون أو أكثر من الجزيء .. أي تحدث عملية تأين للجزيء Ionization وتتكون ايونات موجبة الشحنة أو بالأصح جذر كاتيوني radical cation M بالإضافة إلى ذلك تؤدي الطاقة العالية إلى تكسير رابطة ضعيفة أو أكثر في الجزيء مما يؤدي إلى تكوين ايونات صغيرة أو حطيمات مشحونة أو متعادلة .. وبذلك يحتوي المخلوط الناتج من معاملة المركب بهذه الطريقة على مجموعة من الايونات الموجبة التي تختلف في الكتلة و الشحنة ..ويتم فصل هذه الايونات الموجبة بناءً على اختلافها في نسبة الكتلة إلى الشحنة m/e باستخدام مجال كهربائي ومجال مغناطيسي ..ويتم تسجيل نتائج التحليل في صورة طيف كتلة mass spectrum يوضح كتلة جزيء الايونات ومفتتاتها النسبية

مبدا عمل المطياف الكتلي :

يعتمد مبدأ عمل المطياف الكتلي على توليد أيونات للمادة المدروسة في حيّز خالٍ من الهواء، وإخضاعها لحقول كهربائية ومغنطيسية حتى ترسم في نهاية المطاف الجسيمات المختلفة في الكتلة مسارات متباينة.

وقد تختلف الترتيبات المستخدمة لهذا الغرض من جهاز لآخر، ويظهر في الشكل التالي أحدها وهو الأكثر استخداماً، وهو يتألف من أربعة أجزاء هي:



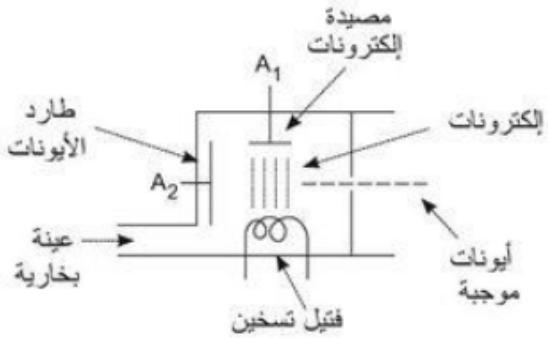
مخطط رمزي لمطياف كتلي

1- حجرة التأين ionization chamber

وهنا تُنتزع الإلكترونات من ذرات العيّنة موضوع الدراسة، فتتحول إلى أيونات موجبة تمتلك جميعها كتلة متقاربة m، وهي تحمل شحنات كهربائية موجبة q = ne مساوية شحنة الإلكترون e أو مضاعفاتها n بالقيمة المطلقة. ويمكن

حالة بخار تحت ضغط منخفض لسيل من الإلكترونات صادر عن فتيل ساخن.

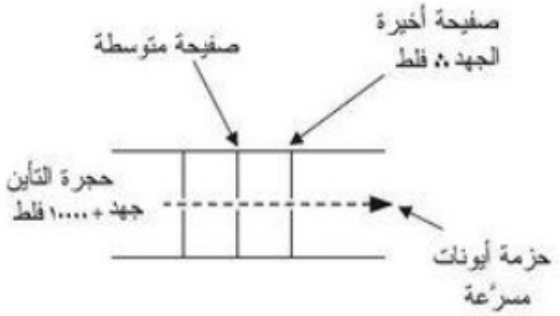
ويبين الشكل التالي وسيلة تحقيق ذلك. إذ تُدخَل العيّنة وهي بحالة بخار إلى حجرة صغيرة فيها فتيل يمر فيه تيار كهربائي، توضع مقابله صفيحة موجبة A_1 فتنجذب الإلكترونات إليها. وباصطدام الإلكترونات المسرَّعة هذه مع ذرات البخار تغدو الذرات متأينة مرة أو أكثر، وتقوم الصفيحة A_2 التي يطبق عليها جهد (كمون) كهربائي موجب بطرد الأيونات بعيداً عنها فتخرج الأيونات من فتحة في حجرة التأين.



حجرة التأين في المطياف الكتلي

2- اقطاب التعجيل acceleration electrodes

يطبق على حجرة التأين جهد كهربائي موجب من رتبة 10000فولت، وتمر الأيونات الخارجة من فتحة حجرة التأين فتَرِدُ على مجموعة مسارٍ كهربائية تطبق عليها جهود كهربائية متناقصة حتى الصفر ڤولت، كما هو ظاهر في الشكل التالي، فتكتسب الأيونات سرعة عالية.



اقطاب تعجيل الأيونات

ويمكن التعبير عن طاقتها الحركية بدلالة الجهد الكهربائي المعجل V بالعلاقة:

$$\frac{1}{2}\ mv^2 = neV$$

وذلك بفرض m كتلة الأيون وv سرعته وne الشحنة الكهربائية التي يحملها.

ومنها يكون:

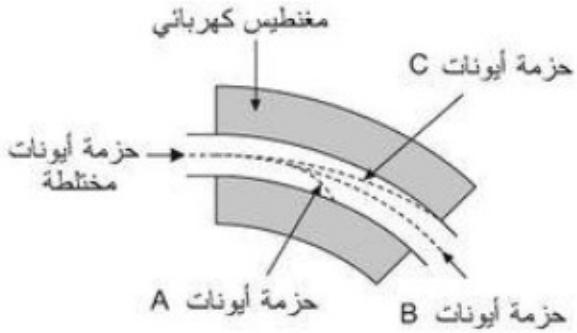
$$v = \sqrt{\frac{2neV}{m}}$$

3- حجرة الانحراف deflection chamber

تخضع الأيونات ذات السرعة v المعطاة بالعلاقة السابقة لدى دخولها منطقة الحقل المغنطيسي B العمودي على مسارها لقوة تجعلها ترسم مساراً بشكل قوس دائرة نصف قطرهاR يعطى بالعلاقة:

$$R = \frac{mv}{neB} = \frac{1}{B}\sqrt{2v\frac{m}{ne}}$$

فالأيونات ذات الكتلة الصغيرة ترسم أقواساً (A) أنصاف أقطارها صغيرة، في حين ترسم الأيونات ذات الكتلة الكبيرة أقواساً (C) أنصاف أقطارها كبيرة كما يظهر في الشكل التالي. كما تقوم الشحنة التي يحملها الأيون بدور في تحديد نصف قطر الدائرة التي يرسمها وهذا واضح من العلاقة السابقة.

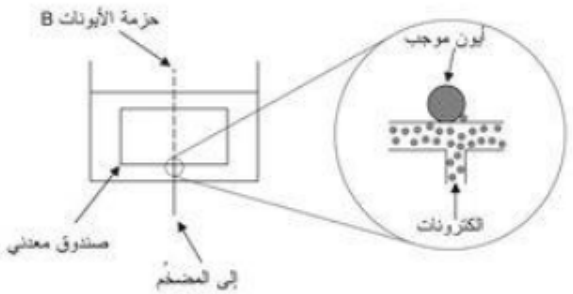


انحراف الأيونات في الحقل المغنطيسي

4- حجرة الكشف detection chamber

تَرِد الأيونات بعد خروجها من منطقة الحقل المغنطيسي إلى حجرة الكشف التي تعلوها فتحة. فإذا تمكَّن أيون من دخول الحجرة والارتطام بقعرها فإنه يكتسب من جدارها الإلكترون اللازم لاعتداله، فإذا وُصِلت الحجرة بمقياس

الأثقل. يجري التحكم بشدة الحقل المغنطيسي B، لكشف كل أنواع الأيونات الموجودة في العيّنة المدروسة.



حجرة الكشف

- من مزايا مطياف الكتلة :

إننا نستطيع الحصول على طيف الكتلة لجميع المركبات العضوية الصلبة والسائلة و الغازية باستخدام كمية ضئيلة جداً من المادة.

- أما من أهم عيوب هذه الطريقة :

فتكمن في عدم قدرتنا على استرجاع المادة بعد التجربة لأنها تتكسر ..

كما أن هذه الأجهزة غالية الثمن لاتتوفر في كثير من المختبرات

يسمح المطياف الكتلي mass spectrograph أو راسم الطيف الكتلي بفصل الذرات بحسب كتلها، شأنه في ذلك شأن المطياف الضوئي الذي يسمح بفصل الضوء بحسب الأطوال الموجية التي يتركب منها. فمن المعلوم أن بالإمكان استخدام المطياف الضوئي لقياس الأطوال الموجية الصادرة عن منبع ضوئي، إضافة إلى قياس الشدات النسبية للأضواء وحيدة اللون التي يتركَّب منها. وبالمثل يمكن استخدام المطياف الكتلي جهاز تحليل للكشف عن

الكتل الذرية المختلفة التي تتألف منها عيّنة ما، وكذلك تقدير الوفرة النسبية لكل منها. كما يمكن استخدامه وسيلة لفصل الذرات المتماثلة في الكتلة.

تاريخه

يعود الفضل إلى ف. و. آستون F.W.Aston في ابتكار أول مطياف كتلوي عام 1920، الذي عمل على تطوير جهاز ابتكره ج.ج. طومسون J.J.Thomson لفصل النظائر isotopes لأول مرة، وهي عناصر لا يمكن تمييزها بعضها عن بعض كيميائياً، إلا أنها تختلف في الكتلة، وباستطاعة المطياف الكتلي تمييزها بسهولة.

(3) المعجل الدوراني السيكلترون The Cyclotron

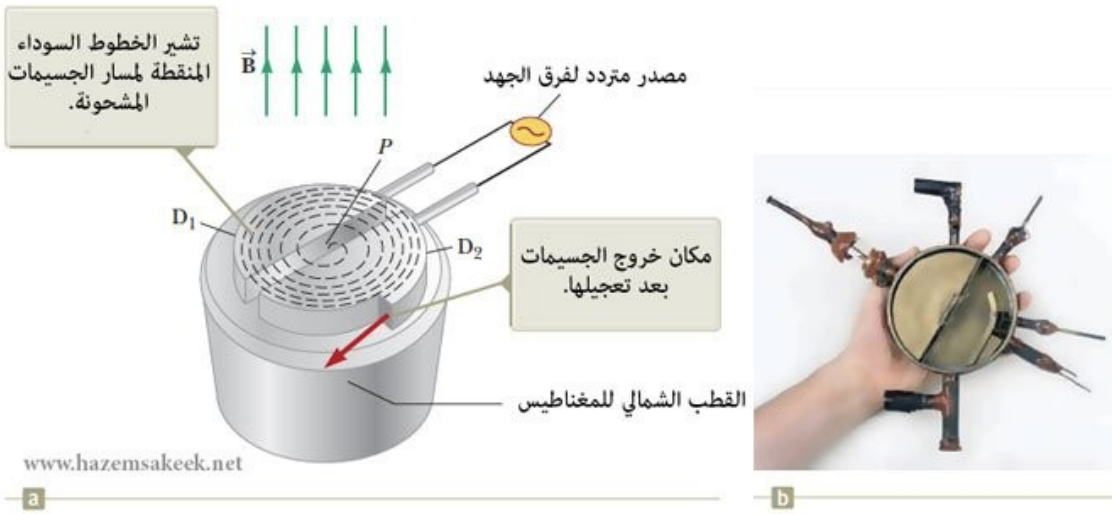
المعجل الدوراني او السيكلترون هو عبارة عن جهاز يعمل على تعجيل الجسيمات المشحونة إلى سرعات عالية جدا. تستخدم الجسيمات المعجلة الناتجة في التصادم مع انوية الذرات لاحداث تفاعلات نووية هامة للمجال البحثي. كما تستخدم العديد من المستشفيات أجهزة السيكلترون في انتاج مواد مشعة للتشخيص والعلاج.

يقوم المجال الكهربي والمجال المغناطيسي بدور هام في فكرة عمل السيكلترون. يوضح الشكل 4 a مخطط يشرح فكرة عمل السيكلترون. تتحرك الشحنات في داخل حاويتين نصف دائريتين لها شكل حرف D ولهذا يطلق عليها اسم D_1 لنصف الدائرة الأولى واسم D_2 لنصف الدائرة الثانية. يطبق فرق جهد ذو تردد عالي على نصفي الدائرتين D_1 وD_2 في وجود مجال مغناطيسي منتظم عمودي عليهما. عند وجود ايون عند النقطة P بالقرب من مركز المغناطيس في احد نصفي الدائرتين وليكن عند D_1 فان الايون يتحرك في مسار نصف دائري والموضح بالخط الأسود المنقط في الشكل 4 a، وعندما يصل الايون إلى الفراغ بين نصفي الدائرتين يكون قد استغرق فترة زمنية مقدارها T/2 حيث ان T هو الفترة الزمنية اللازمة لعمل دورة كاملة حول نصفي الدائرتين والتي تعطى بالمعادلة (2)

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \qquad (2)$$

يتم ضبط تردد فرق الجهد بحيث ان قطبية نصفي الدائرتين تكون معكوسة في خلال الفترة الزمنية التي ينتقل فيها الايون من احد نصفي الدائرتين إلى الأخرى. اذا تم ضبط تردد فرق الجهد بحيث يكون D_1 عند جهد كهربي اقل من D_2 بمقدار V، فان الايون يتسارع عبر الفراغ إلى D_1 وتزداد طاقة حركته بمقدار qV. بعد ذلك يتحرك الايون حول D_1 في مسار نصف دائري نصف قطره اكبر لان سرعة الايون قد ازدادت. بعد مرور فترة زمنية قدرها T/2 فان الايون يصل مرة أخرى إلى الفراغ بين نصفي الدائرتين. لحظة انقضاء هذه الفترة الزمنية تعكس القطبية على نصفي الدائرتين مرة أخرى ويتلقى الايون تعجيل اخر خلال الفراغ بينهما. تستمر الحركة بحيث انه في كل نصف دائرة يكتسب الايون طاقة حركية إضافية تساوي qV. عندما

يصبح نصف قطر المسار مساويا تقريبا لنصف قطر الوعاء نصف الدائري فان الايونات المعجلة تترك النظام وتخرج من خلال فتحة الخروج.



الشكل 4 (a) يحتوي السيكلترون على مصدر ايوني عند النقطة P، وقطعتين على شكل حرف D هما D_1 وD_2 مطبق عليهما فرق جهد متناوب، ومجال مغناطيسي منتظم. (b) اول سيكلترون تم اختراعه بواسطة كلا من لورنس E. O. Lawrence وليفينغستون M.S. Livingston في العام 1934.

تعتمد فكرة عمل السيكلترون على الفترة الزمنية T المستقلة عن سرعة الايون ونصف قطر المسار الدائري كما هو موضح في المعادلة (2).

يمكننا الحصول على صيغة رياضية لطاقة الحركة التي يكتسبها الايون عندما يخرج من السيكلترون بدلالة نصف قطر الوعاء نصف دائري R. من المعادلة نعلم ان $v = qBR/m$ وعليه فان طاقة الحركة تكون على النحو التالي:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$$

عندما تزيد طاقة الايونات في السيكلترون عن 20 MeV تقريبا فان سرعتها تصبح قريبة من الضوء وتظهر الخصائص النسبية عليها (سوف نقوم بشرح ظواهر الفيزياء النسبية في كتاب منفصل مع الفيزياء الحديثة). اثبتت الملاحظات العلمية ان T تزداد وحركة الايونات لا تبقى في نفس الطور مع فرق الجهد المطبق. بعض المعجلات تتغلب على هذه المشكلة من خلال تعديل الفترة الزمنية لفرق الجهد المطبق حتى تبقى الايونات مع فرق الجهد المطبق في نفس الطور.

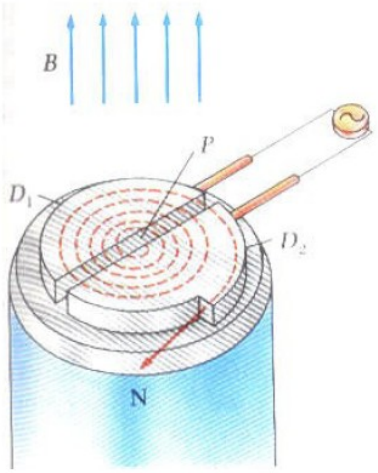
ملاحظة: لا يعتبر معجل السيكلترون من المعجلات المتطورة. يعد السيكلترون من المعجلات الهامة من الناحية التاريخية لانه اول معجل جسيمات تم استخدامه للحصول على جسيمات تتحرك بسرعات كبيرة. لا يزال السيكلترون مستخدما في المستشفيات للتطبيقات الطبية ولكن معظم المعجلات المستخدمة في البحوث العلمية لا تعتمد فكرة عملها على السيكلترون. المعجلات الحديثة تعمل من خلال مبدأ مختلف وتعرف عامة باسم المعجل الدرواني التزامني او السينكروترون synchrotrons.

The Cyclotron

جهاز السنكلترون يعد جهاز حديث تم تصميمه في 1934 ويستخدمفي تعجيل الجسيمات المشحونة إلى سرعات هائلة تستخدم في تجارب التصادمات النووية. وهنا ايضا يستخدم كلا من المجال الكهربي والمجال المغناطيسي لهذا الغرض.

فكرة العمل

يتون السنكلترون من وعائين منفصلين على شكل الحرف الانجليزي D مفرغين من الهواء لتقليل احتكاك الجسيمات المعجلة مع جزيئات الهواء. يطبق فرق جهد متردد على طرفي الوعائين ويطبق مجال مغناطيسي عمودي على الوعائين كما هو موضح في الشكل



يتم اطلاق الجسيمات المراد تعجيلها في وسط المنطقة الفاصلة بين الوعائين لتأخذ مسار دائري وتعود إلى الوسط الفاصل في فترة زمنية قدرها T/2 حيث T هو الزمن الدوي.

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

وبضبط تردد فرق الجهد المطبق بين الوعائين لقلب قطبيتهما ليتوافق مع وصول الجسم المشحون للمنطقة الفاصلة حيث يكون مجالا كهربياً يكسب الشحنة دفعة لتزيد من سرعته وبالتالي يزداد نصف قطر الدوران للجسم المشحون تدريجياً حتى يصل إلى نصف قطر الوعاء وعندها يخرج الجسيم المشحون من المعجل (السنكلترون) بسرعة كبيرة تعتمد على المعادلة

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$v = qBr/m$

فإذا فرضنا أن هذه الجسيمات انبعثت من مصدرها في الوقت الذي كانت فيه الحجرة D1 موجبة الشحنة، عندئذ فان كل جسيم سوف يتعجل عبر الفسحة بين الحجرتين بواسطة قوة كهربائية تؤثر عليه بسبب المجال الكهربائي المتولد في الفسحة بين قطبي مصدر الفولتية المتناوبة داخل الحجره D2سالبة الشحنة بسرعة معينة، وبما أن المجال المغناطيسي المسلط على الجهاز هو بمستوى سطح الحجرة ، لذا فان دخول الجسيم إلى D2 سيكون عموديا على اتجاه المجال المغناطيسي، وستؤثر عليه قوة مغناطيسية تجعله ينجر في دائرة ويخرج من الغرفةD2 في نفس اللحظة تماما التي تنعكس فيها الفولتية فينجذب الى الغرفةD1 دائرة ويخرم من الغرفة D2 إ بسرعة اكبر ويدور في دائرة اكبر. وهكذا تتكرر هذه العملية عدة مرات وفي كل مره يُعجل الجسيم المشحون إلى سرعات اكبر فاكبر وكذلك نصف قطر دائرة دورانه. وفي النهاية تُحرف الجسيمات عن محيط السيكلوترون بواسطة مجال مغناطيسي اخر لتخرج ح على هيئة حزمة ذات طاقة عالية نحو الخارج من خلال المنفذ بهدف استعمالها في قصف هدف محدد، ومن المعادلة (3) نجد ان :

$$v = \frac{qBR}{m}$$

وبما أن أقصى مسار دائري يمكن أن تسلكه الجسيمات المشحونة يعادل نصف قطر السيكلوترون R لذا فان أقصى سرعة يمكن الحصول عليها للجسيمات هي:

$$v_{max} = \frac{qBR}{m}$$

حيث R في هذه الحالة تساوي نصف قطرD1 ،ولكن أقصى طاقة حركية للايون تعطى بالعلاقة:

$$E_K = \frac{1}{2} m v_{max}^2$$

بالتعويض من المعادلة عن قيمة V_{max} ينتج ان أقصى طاقة حركية تكتسبها هذه الجسيمات هي:

$$E_K = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$$

ولكن هذه الطاقة الحركية يمكن معادلتها بالطاقة المكتسبة للايون الموجب نتيجة لعملية التعجيل:

$$E_K = qV$$

$$V = \frac{1}{2} \frac{q}{m} B^2 R^2$$

حيث ان V تمثل فرج الجهد المتناوب .

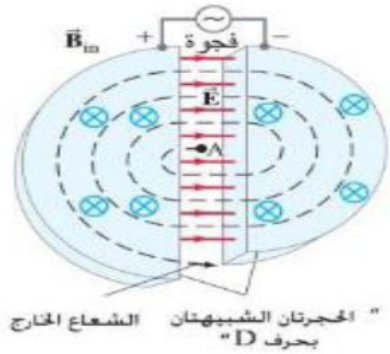
تطبيقات على حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي Application of the motion of charged particle in magnetic field

هنالك عدة تطبيقات عملية تتضمن حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي العديد من هذه التطبيقات العلمية تعتمد على التأثير الفيزيائي للمجالين الكهربائي والمغناطيسي على الاجسام المشحونة حيث انه عند تعريض جسيم مشحون لكال المجالين فإن هذا الجسم سيقع تحت تأثير القوتين الكهربائية $q\vec{E}$ والمغناطيسية $qv \times B$ ومحصلة القوتين تعرف باسم قوة لورنتز Force Lorentz (،)التي تعطى كالتالي:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

يعتبر السيكلوترون من الوسائل المستخدمة في تعجيل الجسيمات المشحونة إلى سرعات عالية جدا وبالتالي طاقة عالية يستفاد منها في قذف الذرة لاجرا تفاعلات نووية صناعية و يستخدم هذا الجهاز كلا من المجالين الكهربائي والمغناطيسي لهذا الغرض .

يبين الشكل ادناه رسما تخطيطيا لهذا الجهاز تظهر فيه الاجزاء الاساسية للسايكلوترون حيث يتكون قلب الجهاز من زوج من الحجر المعدنية D1و D2 المفرغة، تفصلهما فسحة مفرغة من الهواء أيضا. ويسلط على الحجرتين وبشكل عمودي مجال مغناطيسي منتظم ينتج عن قطبين مغناطيسيين. ترتبط الحجرتان إلى مصدر فرق جهد متناوب عالي التردد وبهذا تحصل الحجرتان D1و D2 على شحنات سالبة وموجبة بشكل متناوب. تنبعث الجسيمات المشحونة)البروتونات(من المصدر P الكائن في مركز الفسحة بين الحجرتين.



الشكل يوضح مخطط السايكترون ، يوثر مجال مغناطيسي داخل الصفحة بواسطة مجال مغناطيسي كبير ، تبدا البروتونات من النقطه A حيث مصدر الايونات وان خطوط المجال الموضحة في الشكل هي خطوط لمجال كهربائي متردد داخل الفجوة عند لحظة معينه

مـــثـــال (٩-١)

في أنبوب راسم الذبذبات الكاثودي كان المجال الكهربـي $1.2 \times 10^4\ N/C$ فأوجد المسافة التي سينحرف بها الإلكترون عقب خروجه من المجال مباشرة. علما بأن

الإلكترون يدخل المجال الجارف بطاقة حركة قدرها 2000 electron Volt (eV) وذلك في اتجاه عمودي على المجال. وأن طول اللوح الجارف 1.5 cm.

الحـــل

لحل هذه المسألة نطبق المعادلة (١-٧٢) وهي :

$$y_1 = \frac{eE}{2mv_0^2}x_1^2$$

وحيث إن طاقة الحركة تعطى بالمعادلة : $KE = \frac{1}{2}mv_0^2 = 2000\,eV$

$$\therefore y_1 = \frac{eE}{4(\frac{1}{2}mv_0^2)} \cdot x_1^2 = \frac{eE}{4.KE}x_1^2$$

حيث KE طاقة الحركة.

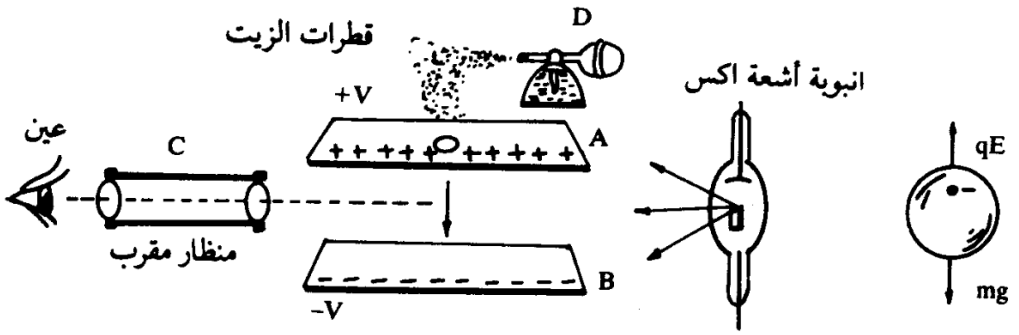
$$\therefore y_1 = \frac{(1.6\times10^{-19})\times(1.2\times10^{4})}{4\,(2000\times1.6\times10^{-19})}\times(0.015)^2 = 3.38\times10^{-4}\,m$$

(١-١٢) قياس شحنة الإلكترون بطريقة ميليكان (تجربة نقطة الزيت)

Measurement of Charge of Electron with Milikan Oil Drop Experiment

استخدم ميليكان عام ١٩٠٩م مجالا كهربيا منتظما في تعيين شحنة الإلكترون (e) وذلك لأول مرة وهي التجربة المعروفة باسم تجربة قطرة الزيت.

ويتركب جهاز ميليكان [شكل ١-٢٧)] من لوحين معدنيين متوازيين A و B وتوجد في اللوح العلوي منهما فتحة صغيرة تسمح بمرور قطرات دقيقة جدا من الزيت والتي يُحصل عليها باستخدام رذّاذ خاص (atomizer). يُمرر شعاع ضوئي بين اللوحين المتوازيين ويُستخدم منظار مقرب في اتجاه عمودي على اتجاه الشعاع الضوئي بحيث يمكن رؤية قطرات الزيت الدقيقة وهي تتساقط بين اللوحين تحت تأثير الجاذبية الأرضية. وتظهر قطرات الزيت هذه في مجال رؤية المنظار على شكل نقاط صغيرة مضيئة.



شكل (٢٧-١): جهاز ميليكان المكون من لوحين متوازيين A و B وتلسكوب C ورذاذ D. وتكتسب قطرات الزيت الإلكترونات عن طريق أشعة أكس

تلتقط قطرات الزيت أثناء تساقطها بعض الإلكترونات الحرة الموجودة في الحيز بين اللوحين A و B ويمكن زيادة عدد هذه الإلكترونات بإمرار أشعة سينية (X-ray) في الوسط المادي بين اللوحين، إذ تؤدي الأشعة إلى تأين الهواء، فتزداد كثافة الإلكترونات الحرة التي يمكن أن تلتقطها قطرة الزيت وبذلك تصبح مشحونة بشحنة سالبة ولتكن $(-q)$.

فإذا سُلط بعد ذلك مجال كهربي منتظم على الحيز الواقع بين اللوحين، بشحن اللوح العلوي بشحنة موجبة واللوح السفلي بشحنة سالبة، فسوف تكون القطرة المشحونة تحت تأثير ثلاثة قوى هي :

١ ـ القوة الكهروستاتيكية وتعمل إلى أعلى ومقدارها :

$$F_1 = qE \quad \ldots\ldots\ldots \quad (١-٧٨)$$

٢ ـ الوزن ويعمل رأسيا إلى أسفل ومقداره :

$$F_2 = mg = \frac{4}{3}\pi a^3 \varrho . g \quad \ldots\ldots \quad (١-٧٩)$$

٣ ـ الدفع إلى أعلى، وهو يمثل دفع الهواء للقطرة إلى أعلى أثناء السقوط وطبقا لقاعدة أرشميدس يكون دفع الهواء للقطرة مساويا لوزن حجم من الهواء حجمه يساوي حجم القطرة أي أن :

$$F_3 = \frac{4}{3}\pi a^3 \varrho' . g \quad \ldots\ldots \quad (١-٨٠)$$

حيث m كتلة قطرة الزيت، ϱ كثافة الزيت، ϱ' كثافة الهواء، g عجلة الجاذبية و a نصف قطر القطرة.

من المعادلتين (١-٧٩) و(١-٨٠) تكون القوة الفعلية المؤثرة إلى أسفل هي :

$$F_4 = \frac{4}{3}\pi a^3 \varrho g - \frac{4}{3}\pi a^3 \varrho' g$$

$$= \frac{4}{3}\pi a^3 g(\varrho - \varrho') \quad \ldots\ldots\ldots \quad (١-٨١)$$

ويمكن عن طريق التحكم في شدة المجال الكهربي E تغيير القوة المؤثرة على قطرة الزيت المشحونة بحيث يكون اتجاه حركتها إلى أعلى في حالة $F_1 > F_4$ أو إلى أسفل في حالة $F_4 > F_1$ وعندما تتساوى القوتان F_4 , F_1 تظل هذه القطرة بين اللوحين في حالة اتزان بين القوتين أي أن :

$$F_1 = F_4$$

$$\therefore qE = \frac{4}{3}\pi a^3 g(\varrho - \varrho') \quad \ldots\ldots \quad (١-٨٢)$$

ولما كان نصف القطر a صغيرا جدا بحيث يصعب قياسه عمليا، استخدم ميليكان لتعيينه طريقة ستوك لقياس اللزوجة والتي تنص على أن :

«الجسم الساقط في وسط لزج يكتسب سرعة نهائية منتظمة (terminal velocity) عندما تكون القوة الفعلية المؤثرة على الجسم إلى أسفل مساوية تماما قوة اللزوجة».

أي أن :

$$\frac{4}{3}\pi a^3 (\varrho - \varrho') = 6\pi\eta v a \quad \ldots\ldots \quad (١-٨٣)$$

حيث η معامل لزوجة الوسط و v سرعة الجسم

ولقياس سرعة السقوط الحر v للقطرة في الهواء بعد إزالة المجال الكهربي يستخدم خطان دقيقان متوازيان في مجال رؤية المنظار يحددان مسافة سقوط معلوم وبتسجيل زمن سقوط القطرة خلال هذه المسافة يمكن إيجاد سرعة السقوط الحر.

وبمعرفة كثافة الهواء (ϱ′) ومعامل لزوجته (η) وكثافة قطرة الزيت (ϱ) يمكن حساب نصف القطر (a) للقطرة التي تحت التجربة وبالتالي يمكن حساب مقدار الشحنة q باستخدام المعادلة (٨٢-١) بعد معرفة شدة المجال الكهربي (E).

وقد وجد ميليكان أن الشحنة على القطرة q تكون دائما مضاعفا صغيرا لكمية شحنة ثابتة e وهي شحنة الإلكترون.

مثال (١٠ - ١)

تحرك إلكترون في مجال كهربي شدته 10^4 N/C واتجاهه الى أعلى مسافة قدرها 1 cm من حالة السكون. احسب السرعة وطاقة الحركة التي اكتسبها وكذلك الزمن اللازم لقطع هذه المسافة.

الحل

بما أن القوة التي تؤثر على الإلكترون ثابتة فالتسارع (العجلة) ثابت ويساوي :

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{(1.6 \times 10^{-19}) \times 10^4}{9.1 \times 10^{-31}} = 1.8 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$$

$$v = \sqrt{2ax} = \sqrt{2 \times (1.8 \times 10^{15}) \times 10^{-2}} = 6.0 \times 10^6 \text{ m/s}$$

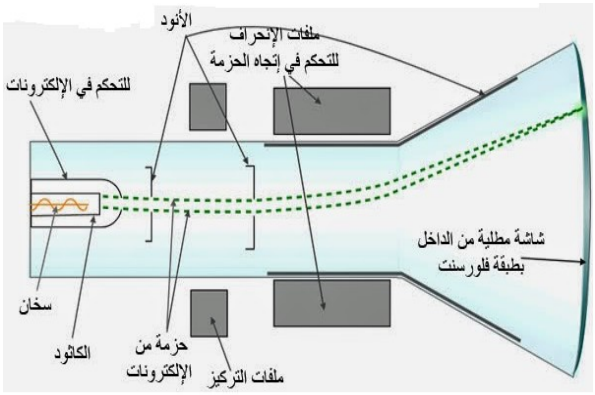
$$KE = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \times (9.1 \times 10^{-31}) \times (6.0 \times 10^6)^2 \simeq 16 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$t = \frac{v}{a} = \frac{6.0 \times 10^6}{1.8 \times 10^{15}} = 3.3 \times 10^{-9} \text{ s}$$

أنبوبة أشعة الكاثود

بالاستفادة مما سبق ذكره فقد تم تصميم انبوبة اشعة الكاثود التى استخدمت فى كثير من الشاشات لاجهزة الكمبيوتر والتليفزيزيون وغيرهما من اجهزة عرض الفيديو قبل ظهور الشاشات الحديثة الان مثل (CRT , LCD , LED).

يوضح الشكل التالى تركيب أنبوية أشعة الكاثود:



حيث تتركب من إنتفاخ زجاجى مفرغ من الهواء على شكل مخروطى قاعدته تمثل الشاشة التى تظهر عليها الصورة وهى عبارة لوح زجاجى سميك تغطى من الداخل بطبقة فسفورية له القدرة على إشعاع ضوء وذلك عند إصطدام الشعاع الالكترونى بهذه الطبقة.

ينتهى المخروط الزجاجى بعنق رفيع ويحتوى على قاذفة الكترونية وهى المسؤولة عن توليد الشعاع الالكترونى وتزويدة بالسرعة اللازمة للاصطدام بالشاشة فيجعل الشاشة تضئ وتتكون هذه القاذفة من مجموعة مكونات وهى:

الفتيلة : وهى تقوم بتوليد طاقة حرارية عند مرور التيار الكهربى بها.

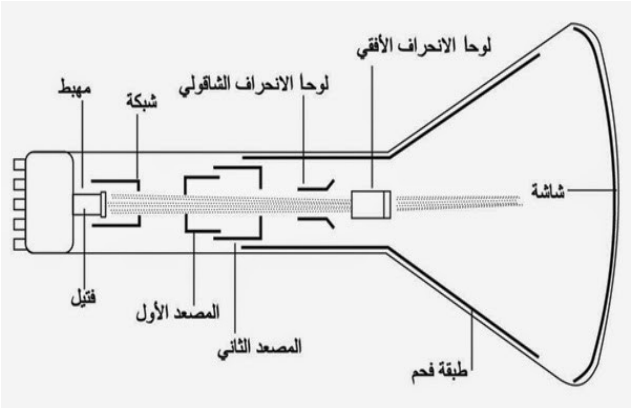
الكاثود : ويصنع من مادة مشعة من الاكترونيات والذى يتم تسخينها بواسطة الفتيلة فتنطلق منه عدد كبير من الاكترونات والتى تشكل الشعاع الالكترونى.

الشبكة الحاكمة : وهى على شكل إسطوانى بها ثقب صغير جدا تمر منه الالكترونات المنطلقة من الكاثود على شكل حزمة الكترونية ويتم التحكم فى كمية الالكترونات من خلالها وذلك بالتحكم فى الجهد السالب المار بها.

أقطاب التعجيل : وتتكون من مصعدين وهما مسؤلان عن زيادة سرعة الشعاع الالكترونى كما يعملان على تركيز الشعاع الالكترونى.

ملفات الانحراف : وهى تنقسم الى مجموعتان ملفات إنحراف رأسية وملفات إنحراف أفقية واللتان تقومان بتمديد الشعاع الالكترونى أفقيا ورأسيا فيتمدد من نقطة ليملأ الشاشة كاملة.

طريقة عمل تعتمد على ما سبق ذكره من حركة الالكترون داخل المجالات الكهربية والمغناطيسية ويمكن ان تتخلص كالتالي:



عند توصيل الانبوبة بالتيار الكهربى يمر التيار أولا عبر الفتيلة والتى تسخن عند مرور التيار بها مما يؤدى الى تسخين الكاثود والذى يقوم بدورة بإشعاع الكترونات ولكن تتحرك بأسلوب غير منتظم فتمر عبر الشبكة الحاكمة والتى تنظم الاكترونات على شكل حزمة الكترونية رفيعة.

بعد ذلك يمر الشعاع من خلال أقطاب التعجيل والتى تقوم بزيادة سرعة الشعاع بشكل كبير فيسقط الشعاع على الشاشة مكون نقطة بيضاء وهنا يأتى دور ملفات الانحراف والتى تقوم بمسح هذه النقطة وتمديدها أفقيا ورأسيا وبذلك تضئ الشاشة بكاملها مع العلم أن عملية المسح تتم بشكل سريع يصعب على العين أن تستوعبها.

كما يتم التحكم فى معالم الصورة وذلك من خلال التحكم فى شدة الشعاع الالكترونى فكلما زات شدته زادت شدة الضوء المنبعث من الحبيبات الفسفورية.

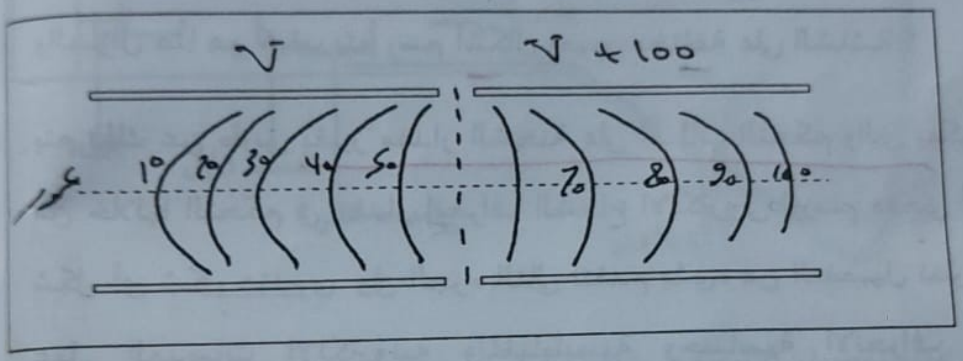
والسؤال هنا هو كيف يتم رسم أشكال وصور مختلفة على الشاشة ؟

يتم ذلك عن طريق تغيير مقدار الشحنة على أقطاب التحكم والتى يمكن من خلالها التحكم فى مقدار إنحراف الشعاع الالكترونى ليرسم منحنى أو شكل أى شكل هندسى.

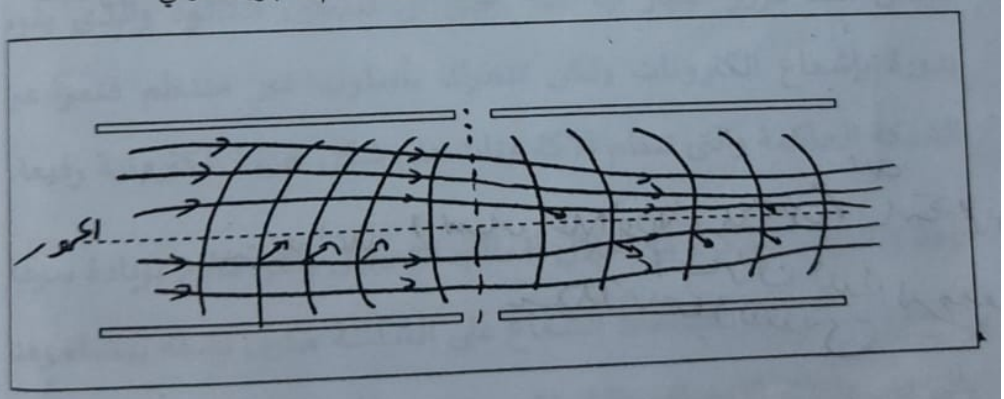
هناك العديد من التطبيقات التي تعتمد علي التأثير الفيزيائي للمجالات الكهربية والمغناطيسية علي الأجسام والمشحونة وسوف نستعرض فيما يلي بعضاً من تلك التطبيقات:-

العدسات الكهروستاتيكية

في الشكل التالى يوضح نظام كهروستاتيكي مجمع للإلكترونات يتكون من أسطوانتين موضوعين تحت جهد كهربي غير متساوي بحيث تكون الأسطوانة الأولي تحت جهد كهربي أقل أما الأسطوانة الثانية تحت جهد كهربي أعلى وتحتوي هاتين الأسطوانتين علي خطوط تساوي الجهد وفيما يلى شرح لكيفية عمله:



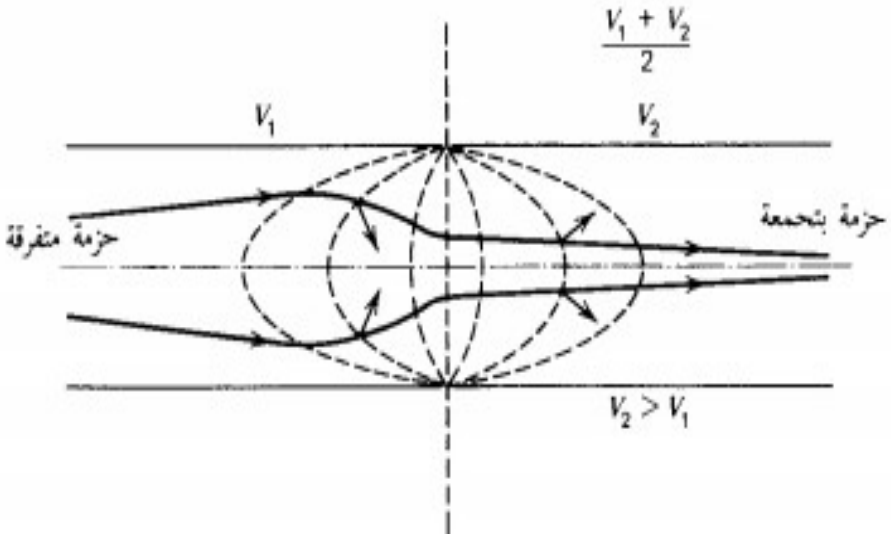
شكل يوضح خطوط تساوى الجهد داخل النظام الكهروستاتيكي



شكل يوضح مسار للحزمة اشعة الالكترونية داخل النظام الكهروستاتيكي

يبين الشكل التالي
عدسة

كهروستاتيكية وهي مكونة من إسطوانتين متساويتي القطر ومشتركتين في المحور ومفصولتين عن بعضيهما بحيز فاصل ، وجهد الإسطوانة الأولى V_1 في حين أن جهد الإسطوانة الثانية V_2 . وتبين الخطوط المتقطعة أسطح تساوي الجهد . ويظهر على الشكل حزمة متفرقة من الأشعة الإلكترونية تدخل العدسة (من اليسار) . وكما هو معلوم تكون القوة المؤثرة على الإلكترون في إتجاه زيادة الجهد وعمودية على أسطح تساوي الجهد . وبذلك فإنه حتى منطقة الحيز الفاصل تكون القوة المؤثرة على الإلكترونات قوة مجمعة (أي تؤدي الى تجميع الإلكترونات في إتجاه محور الإسطوانة) . أما في المنطقة اليمنى أي بعد عبور الإلكترونات للحيز الفاصل يصبح إتجاه القوة مفرقاً من جديد . وعلى الرغم من أن المجال متناظر تماماً حول الحيز الفاصل إلا أن شدة التفرق بعد عبور الحيز تكون أقل من شدة التجميع قبل عبور الحيز حيث أن سرعة الإلكترونات بعد عبور الحيز تكون أكبر.. وبالإضافة الى ذلك فإن القوة المؤثرة على الإلكترون وهو بعيد عن المحور تكون أكبر بكثير من القوة المؤثرة عليه وهو قريب من المحور حيث أن هذه القوة تزيد بزيادة المسافة عن محور الإسطوانة . وعلى ذلك فإن هذه المجموعة تعمل كعدسة مجمعة للأشعة الإلكترونية ويمكن التحكم في قيمة بعدها البؤري وذلك عن طريق التحكم في فرق الجهد بين الإسطوانتين . ويتم أحياناً بناء مثل هذه العدسات الكهروستاتيكية من أسطوانتين مختلفتي القطر .



وعند دخول حزمة إلكترونية متفرقة من مصدر بسرعة ابتدائية (u) فإنه يؤثر عليها من النصف الأول من المجال قوي عمودية علي خطوط تساوي الجهد يمكن تحليلها إلي:

(أ) المركبة الأفقية وهي اتجاه حركة الإلكترون إلي داخل المجال .

(ب) المركبة الرأسية وهي في اتجاه عمودي علي اتجاه حركة الإلكترون مقربة من المحور. وإذا ما انتقلنا من النصف الأول للمجال إلي النصف الثاني تؤول هذه المركبات إلي المحور.

(ج) المركبة الأفقية وهي في اتجاه حركة الإلكترونات إلي خارج المجال (أي نفس اتجاه المركبة أ).

(د) المركبة الرأسية وهي في اتجاه عمودي علي اتجاه حركة الإلكترونات تبعد عن المحور أي عكس اتجاه المركبة (ب).

ويجب ألا يغيب عن أذهاننا أن الإلكترون في النصف الثاني من المجال يتحرك بسرعة أكبر من تلك التي تحرك بها في النصف الأول وذلك نتيجة لتسجيله داخل المجال وعلي ذلك فإن تأثير المجال علي حركة الإلكترون في النصف الثاني منه بذلك فإن المركبتين (ب) ، (د) لا يلاقي كل منهما الأخر. بل ينصرف الإلكترون في النهاية بمحصلة المركبتين بهذه الطريقة يتحرك الإلكترونات عند خروجها من المجال الإلكتروستاتيكي في مسارات متجمعة

الضوئية في تجميع أشعة الضوء من التوزيع للمجال بالعدسة الإلكترونية كما هو موضح فى الشكل السابق.

وفيما يلى نوضح تعبيرا رياضيا لاثبات ان النظام الالكتروستاتيكي يشبه فى عمل العدسة الضوئية:

بالاستعانة بالشكل التالى حيث نفرض مجالين متتاليين جهدهما علي الترتيب V_1 ، V_2 ويفصل بينهما مسافة قدرها d وأن الشعاع الإلكتروني يسير في المجال V_1 بسرعة u_1 ويسقط بزاوية θ_1 مع الخط العمودي علي السطح الفاصل وعندما يدخل الإلكترون الفجوة (المسافة الفاصلة بين المجالين) d فإن مركبة السرعة العمودية علي السطح الفاصل تزيد نتيجة لتأثرها بقوة نتيجة هذا المجال وهى ($e.\frac{V_2-V_1}{d}$) بينما لا تتأثر المركبة الثانية حيثُ لا توجد قوة مناسبة وعلية فإن الإلكترون ينتقل إلي الوسط بسرعة u_2 صانعاً زاوية θ_2 مع الخط العمودي علي السطح الفاصل.

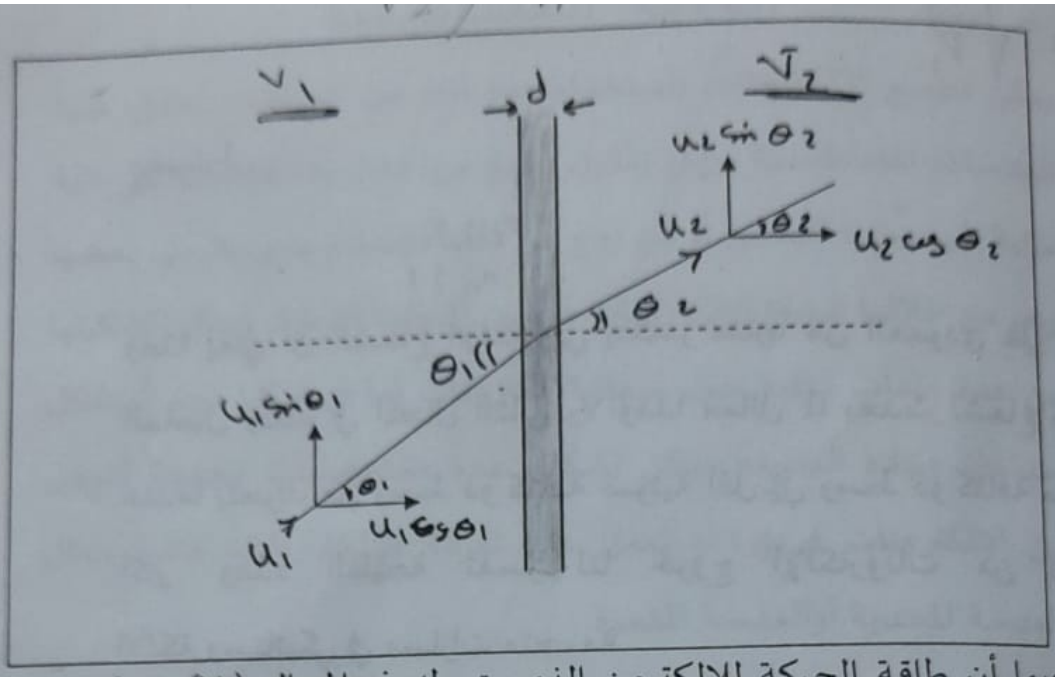
ونتيجة لما سبق فان:

$$V_2 \cos\theta_2 \rangle V_1 \cos\theta_1$$

$$, V_2 \sin\theta_2 \rangle V_1 \sin\theta_1$$

$$\therefore \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_2}{V_1} = n_{12}$$

حيثُ (n_{12}) معامل الانكسار من الوسط الأول إلى الوسط الثاني



وبما أن طاقة الحركة للإلكترون الذي يتحرك في المجال (V_1) تعطي من المعادلة :-

$$\tfrac{1}{2} m u_1^2 = e V_1$$

$$\therefore u_1 = \sqrt{\frac{2e V_1}{m}}$$

وكذلك طاقة الحركة للإلكترون في المجال الثني V_2 تعطي من المعادلة :-

$$\tfrac{1}{2} m u_2^2 = e V_2$$

$$\therefore u_2 = \sqrt{\frac{2e V_2}{m}}$$

إذن بالتعويض عن قيم السرعات u1 , u2 فى معادلة معامل الانكسار السابقة ينتج ان:

$$n_{12} = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}}$$

وحيث أن

$$V_2 \rangle V_1$$
$$\therefore n_{12} \rangle 1$$

وهذا يعني أن الشعاع الإلكتروني ينكسر مقترباً من العمودى على الح
الفاصل وذلك في المجال الثاني V_2 وهذا مماثل لما يحدث لشعاع ضوئي
عندما يتحرك من وسط ذو كثافة ضوئية أقل إلي وسط ذو كثافة ضوئية
أكبر. وهذه النتيجة تفسر لنا خروج الإلكترونات من المجال
الألكتروستاتيكي في مسارات متجمعة.

الـمـيـكـروسـكـوب الالـكـتـرونـي

Electron microscope

مقدمة: بداية نحتاج الى ان نتعرف على معامل مهم فى عملية التكبير هو قوة التمييز (Resolution power)أو قوة التبيين (التحليل) (Resolving power) وهي أصغر مسافة بين أصغر جسمين متقاربين يمكن أن نراهما بوضوح تام مفصولين تماماً عن بعضهما من غير أي تداخل.

وحيث ان قوة التبيين لا يحددها نوع العدسة المستخدم فى عملية الفحص وإنما يحددها الطول الموجي (λ) للموجه الساقطة على العينة حيث ان العلاقة عكسية بين قوة التبيين والطول الموجي بمعنى انه كلما قل الطول الموجي تزداد قوة التبيين. وعليه فان قوة التبيين للميكروسكوب الضوئي لها حد معين ذا قيمة محددة مرتبطة بالطول الموجي لموجه الضوء وهو ثابت. وفيما يلى نستعرض ذلك بصورة تاريخية بسيطة من خلال تجارب بعض العلماء فى هذا الصدد:

البداية: افترض العالم Ernst Abbe إن القدرة التحليلية لأي ميكروسكوب تعتمد على الطول الموجي للضوء المستخدم وبالتالي فان الميكروسكوبات التقليدية المعتمدة على الضوء المرئي سوف يكون لها حد أقصى للقدرة التحليلية لا يمكن أن تتجاوزه بأي حال من الأحوال ولهذا طور العالم Koehler جهاز ميكروسكوب يعمل بالأشعة الفوق بنفسجية وبالرغم من أن

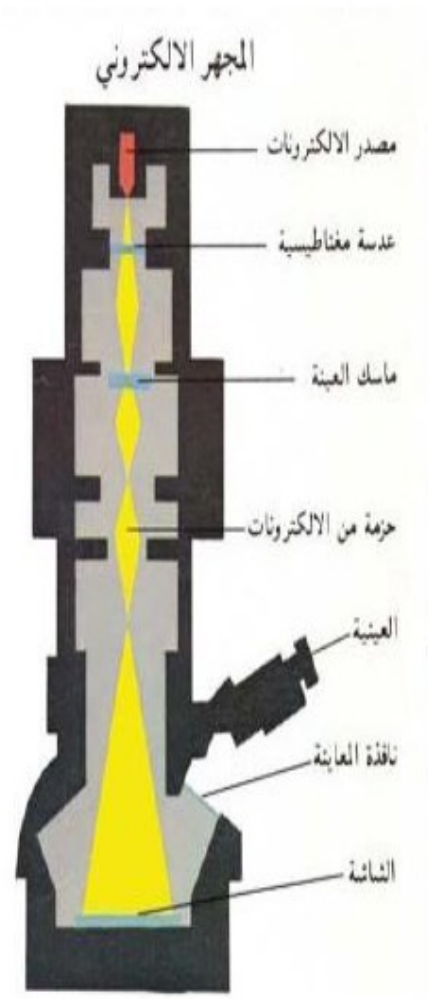
ذلك زاد القدرة التحليلية إلا أن اعتماد هذا الميكروسكوب على استخدام بصريات مصنعة من الكوارتز ،لان الزجاج العادي يمتص الأشعة فوق البنفسجية، جعل سعره مرتفعا جدا. عند هذه المرحلة أصبح واضحا لدى العلماء أن الحصول على صور دقيقة بحجم أجزاء من الميكرون مستحيلا نظرا لقيود الطول الموجي للضوء المستخدم.

مع المزيد من الاكتشافات التي بدأت في العام 1858 بواسطة العالم Plücker الذي استطاع التحكم في أشعة الكاثود (وهي حزمة من الالكترونات ولكن لم يكن ذلك معروفا إلا بعد تجارب العالم ج ج طومسون) بواسطة المجالات المغناطيسية. تمكن العالم Riecke في العام 1891 من تبئير أشعة الكاثود بواسطة المجالات المغناطيسية مما يعني انه استطاع تصميم عدسة مغناطيسية بسيطة.

في العام 1928 في الجامعة التكنولوجية في برلين قام العالم Max Knoll برئاسة فريق بحثي بتطوير عدسات للتحكم في أشعة الكاثود لاستخدامها في الحصول على صور مكبرة. وبعد ثلاثة أعوام من الأبحاث والتجارب تمكن العالم Max Knoll وفريقه من الحصول على أول صورة مكبرة لشبكة وضعت فوق فتحة الانود وكان هذا في العام 1931. في نفس العام تمكن العالم Reinhold Rudenberg في شركة سيمينز Siemens company من الحصول على براءة اختراع للعدسة الكهروستاتيكية في الميكروسكوب الالكتروني

في ذلك الوقت كان السلوك المزدوج للالكترونات معروفا من خلال الفرضية التي وضعها العالم دي برولي De Broglie hypothesis وهي أن كل جسيم له سلوك موجي وبالتالي وجد أن الإلكترون يسلك سلوك موجي بالإضافة إلى سلوكه الجسيمي مثله مثل الضوء تماما وبالرغم من أن فرضية دبرولي وضعت في العام 1927 إلا أن الفريق البحثي المكلف بتطوير قدرة الميكروسكوب لم يكن يعلم بهذه الفرضية حتى العام 1932 وبمجرد أن وصلتهم تلك الفرضية والتجارب التي أكدت صحتها لاحظ العلماء انه بالإمكان استخدام الموجة المصاحبة للإلكترون في عملية التكبير في الميكروسكوبات لان هذه الموجة اصغر كثيرا من الطول الموجي للضوء المرئي (الطول الموجي المتوسط للضوء 5000 انجستروم في حين إن الطول الموجي المصاحب للإلكترون في حدود 1 انجستروم) وبالتالي يمكن تطوير أجهزة تكبر الأشياء على المستوى الذري. في العام 1933 تم الحصول على أول نجاح للحصول على صور مكبرة لعينة من ألياف القطن قبل أن تصاب العينة بالضرر نتيجة لاصطدام الالكترونات بها.

بعد هذا النجاح ازداد الاهتمام بالميكروسكوب الالكتروني من قبل العديد من المجموعات البحثية لتطويره واستمر التطوير ايضا في شركة سيمينز للحصول على صور لعينات بيولوجية وفي العام 1938 تم بناء أول جهاز TEM وهو الميكروسكوب الالكتروني النافذ. والصورة التالية توضح شكل عام لميكروسكوب الكتروني:



وفي الميكروسكوب الإلكتروني تمر الإلكترونات من خلال سلسلة من المجالات المغناطيسية تشبه في عملها نظام العدسات في المجهر الضوئي وبذلك فالإلكترونات التي تنعكس عن العينة والتي تنفذ من خلالها تبعاً لكثافة التراكيب في العينة المفحوصة يمكن استقبالها على لوحات حساسة أو مشاهدتها على شاشات خاصة مفسفرة تسمح برؤية الصورة لامعة.

ومما هو جدير بالذكر أن الفحص الميكروسكوب الإلكتروني يحتاج إلى معاملات خاصة سواء في تحضير العينة أو في إعداد المجهر للفحص.

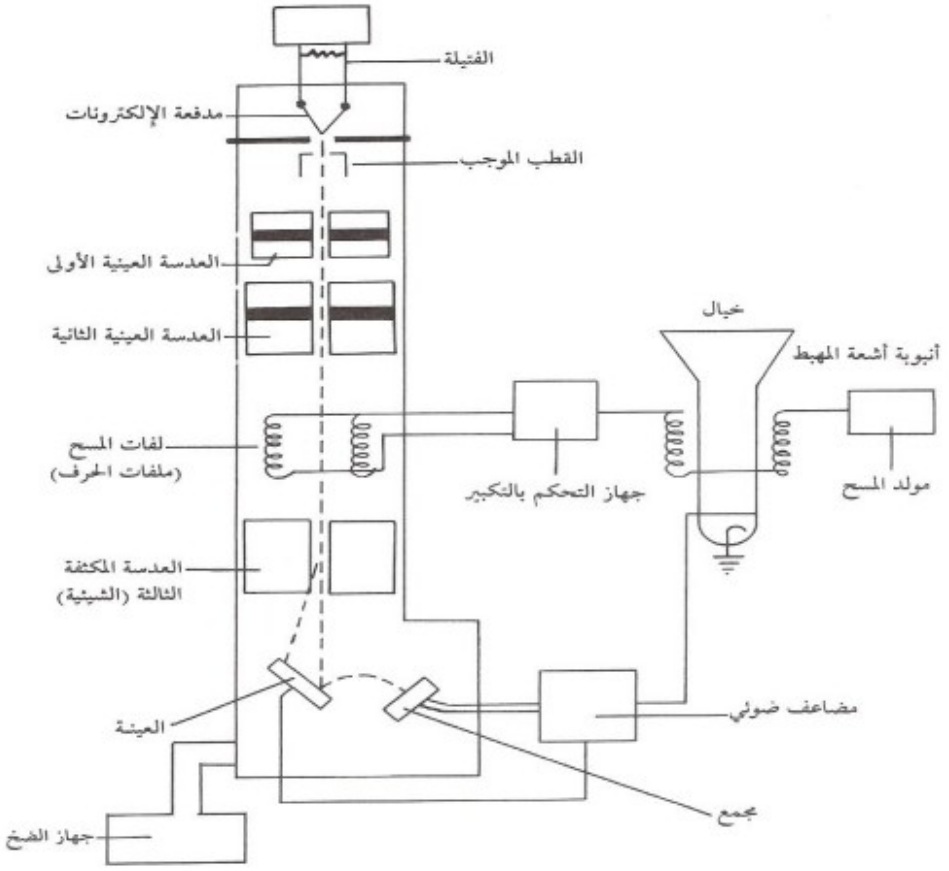
من أنواع الميكروسكوب الالكتروني :

المجهر الإلكتروني الماسح: (SEM) Scanning electron microscope

تقوم كمية قليلة من الإشعاع الإلكتروني بمسح العينة فتتجمع الإلكترونات المنبعثة من العينة لتكون الصورة المنبعثة على أنبوبة أشعة المهبط. والشكل التالى يوضح تركيبه بصورة مبسطة

توضع العينة المراد فحصها داخل العمود المفرغ من الهواء في المجهر الالكتروني من خلال مدخل أو سدادة محكمة الاغلاق .

وبعدما يفرغ العمود تمامًا من الهواء يطلق المدفع الإلكتروني حزمة شعاعية ذات طاقة عالية من الإلكترونات، ينطلق هذا الشعاع الإلكتروني متجها إلى الأسفل عبر سلسلة من العدسات المغناطيسية التي صممت لتقوم بتركيز وتجميع الإلكترونات في موضع محدد و دقيق.



بالقرب من نهاية العمود المفرغ السفلية توجد مجموعة من الملفات المغناطيسية الماسحة،والتي تقوم بدورها بتحريك الشعاع المركز من الإلكترونات فوق العينة المراد فحصها ذهابًا و إيابًا و صفًا تلو الآخر حتى يتم تغطية العينة كلها.

وعند ملامسة الشعاع الإلكتروني لسطح العينة تتحرر بعض الإلكترونات الثانوية من سطح العينة، ويتم الكشف عن هذه الإلكترونات المحررة عبر كاشف خاص يقوم أيضا بحصرها وإرسال إشارة خاصة لجهاز مكبر

تتكون الصورة النهائية تبعا لعدد الإلكترونات المحررة من كل نقطة على سطح العينة، وبذلك تنشأ الصورة محاكية تماما للعينة و مطابقة لها .

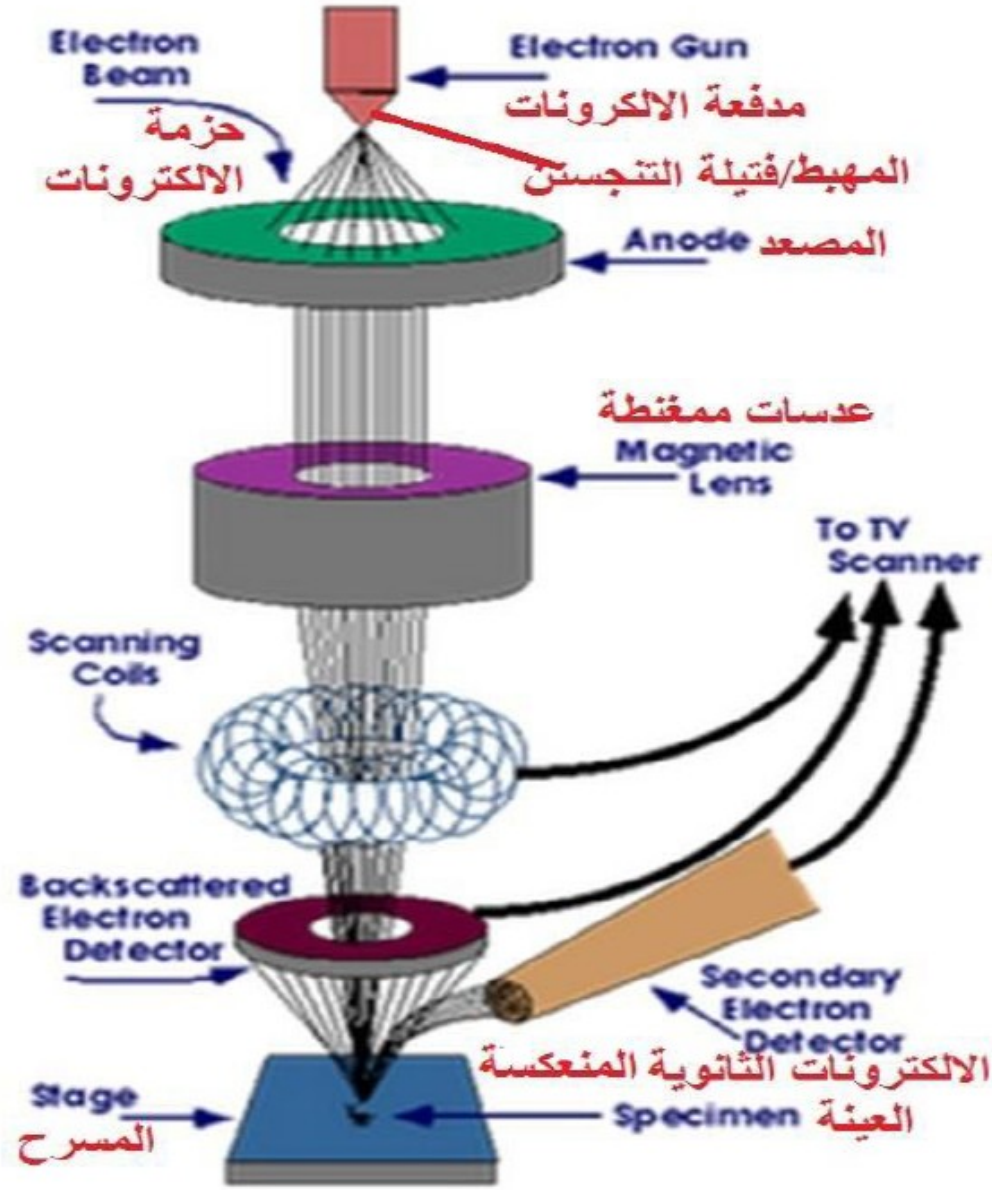
الميكروسكوب الإلكتروني النافذ

Transmission electron microscope (TEM)

في حالة الميكروسكوب النافذ تتعرض العينة كلية للإشعاع الإلكتروني الذي ينفذ أو يمر من العينة ليكون الصورة على شاشة العرض ويأتي التباين في الصورة من الإختلافات في الكثافة الإلكترونية للعينة , أو من كمية الإلكترونات التي تمر من خلال العينة..

إن الميكروسكوبات الإلكترونية النافذة لها دقة أعلى بكثير من الميكروسكوبات الضوئية نتيجة الموجة المادية الصغيرة للإلكترونات، مما يمكّن المستخدم من فحص تفاصيل العينة بشكل دقيق إلى درجة صف من الذرات وذلك بشكل يبلغ عشرة آلاف مرة قدرة تكبير مقارنة مع الضوئي. يمثّل الميكروسكوب الإلكتروني النافذ TEM وسيلة تحليل أساسية في العديد من فروع العلوم الطبيعية مثل علم المواد وأبحاث أشباه الموصلات بالإضافة إلى العلوم الحيوية مثل علم دراسة الفيروسات وأبحاث السرطان. وهو ايضا لفحص العينات حيه لانه لايتطلب مقاطع .

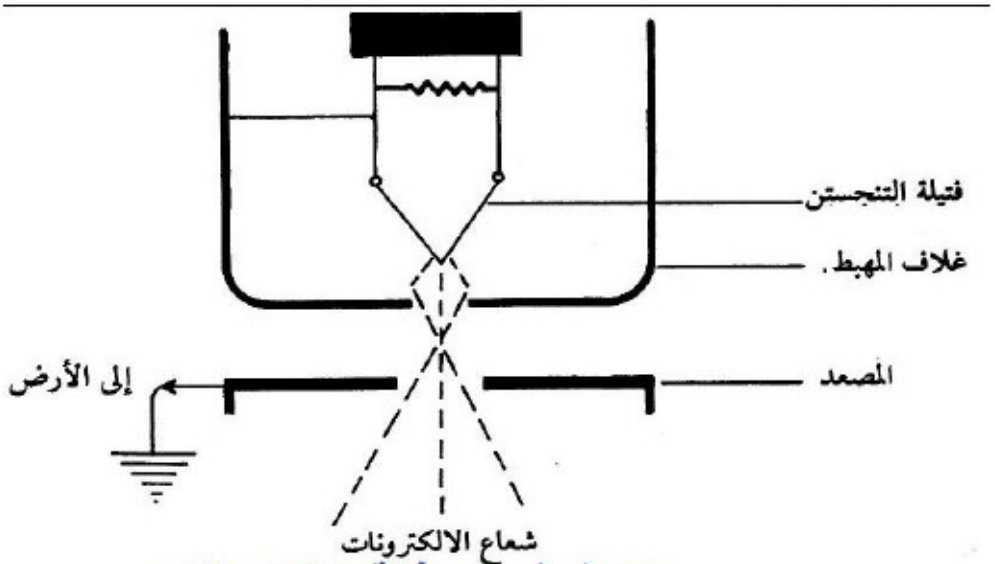
والشكل التالى يوضح التركيب الأساسي للمجهر الالكتروني النافذ



وفى اى ميكروسكوب الالكتروني الشيء الاساسى هو اصدار الاشعة الالكترونية المستخدمة فى فحص العينات ومن هذا المنطلق لابد ان نستعرض سريعة تركيب المدفع الالكتروني **Electron Gun** والذى تتكون بصورة اساسية من الفتيلة و المصعد حيث ان:

الفتيلة عبارة عن سلك من التنجستن صغير على هيئة مخروط يعرف أيضا بالمهبط ويغلف المهبط صفيحة سالبة الشحنة تعرف بغلاف المهبط تساعد في ابتعاد الالكترونات عن منطقة المهبط ودفعها الى ثقب المصعد.

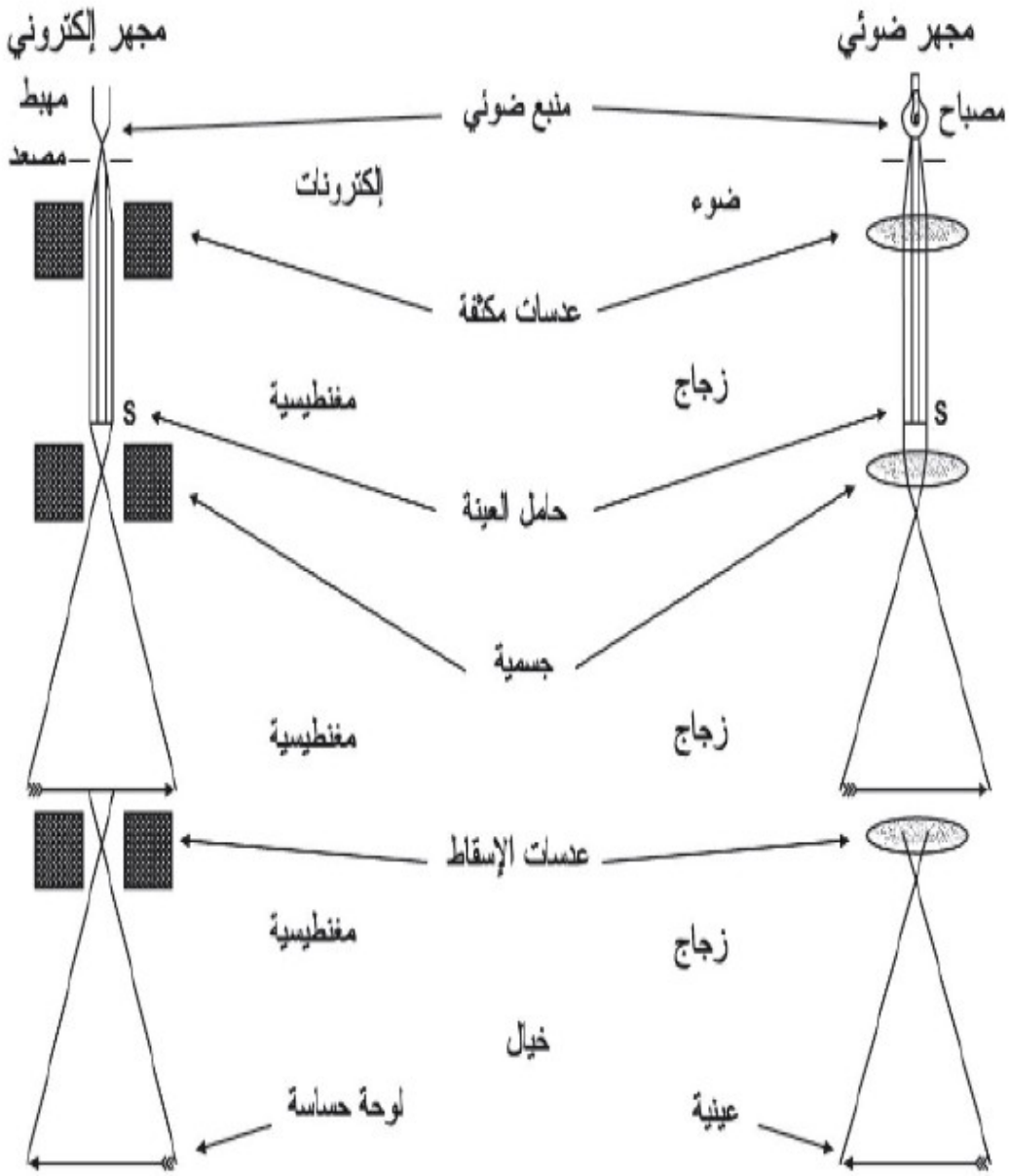
اما المصعد فهو عبارة عن قطعة معدنية دائرية الشكل في مركزها ثقب.



رسم تخطيطي لمدفعة الالكترونات

اما مسار الاشعة الالكترونية داخل الميكروسكوب والتحكم فيها واسقاطها على العينة فقد تم شرحه فى الاجزاء السابقة عن الحديث عن حركة الالكترون فى المجالات الكهربية والمغناطيسية وايضا شرح العدسات الالكترونية والمغناطيسية.

والشكل التالي يلخص اوجه التشابه بين الميكروسكوب الضوئي


مجهر إلكتروني
مجهر ضوئي
مهبط
مصعد
منبع ضوئي
مصباح
إلكترونات
ضوء
عدسات مكثفة
مغنطيسية
زجاج
S
S
حامل العينة
جسمية
مغنطيسية
زجاج
عدسات الإسقاط
مغنطيسية
زجاج
خيال
لوحة حساسة
عينية

الميكروسكوب الإلكتروني الماسح

Scanning Electron Microscopes (SEM)

الميكروسكوب الإلكتروني الماسح scanning electron microscope والذي يعرف بالاختصار SEM.

لسبب واحد فقط وهو إن الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM يكبر الأشياء لدرجة تصل إلى 300,000 مرة. ويشير العلماء إلى هذا الرقم بمصطلح يعرف باسم قوة التكبير magnification power ويشار للرقم بالشكل التالي $300,000^{x}$، بالمقابل فان قوة التكبير في الميكروسكوب الضوئي لا تتجاوز بضعة مئات فقط. كما ان جهاز SEM يمتلك عمق تبئير كبير depth of field بالمقارنة مع الميكروسكوبات التقليدية، مما يعني إمكانية الحصول على صور ثلاثية الأبعاد وتحليلها، في حين أن الميكروسكوب الضوئي لا يوفر إلا صور سطحية ثنائية الأبعاد. وأخيرا فان جهاز SEM يستطيع أن يرى أكثر من السطح فهو أيضا يعطي معلومات على المركبات التى تدخل فى تركيب العينة التى ينظر إليها. كل هذه بالطبع فان جهاز SEM مثله مثل أي جهاز يمتلك بعض العيوب، والتي تتركز في ارتفاع ثمنه. فالجهاز الأرخص منه يكلف عشرات الآلاف من الدولارات وهناك أجهزة متقدمة أكثر يمكن أن يصل ثمنها إلى مئات آلاف الدولارات. كما إن أجهزة SEM أجهزة كبيرة وتحتوي على أجهزة دقيقة ومعقدة، وتتطلب خبرة ودراية عالية لتشغيلها. ونتيجة لهذا فان استخدام هذه الأجهزة مقصورا على المنشآت الصناعية والبحثية، وهذه الأجهزة لها تطبيقات واسعة وأصبحت من الأدوات الأساسية لأي مؤسسة بحثية أو منشأة صناعية.

سوف نقوم بشرح مفصل لفكرة عمل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM وكيف يستطيع أن يظهر الصور المكبرة بتفاصيل عالية الدقة والتي لا يمكن الاستغناء عنها في الأبحاث العلمية وخصوصا تقنية النانو وعلوم المواد والعلوم الأخرى. كما سوف نوضح الاكتشافات الحديثة التي طرأت على هذه التقنية. ولكن قبل الوصول لهذه النقطة لنبدأ بالبدايات مع هذا الجهاز.

تاريخ الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM

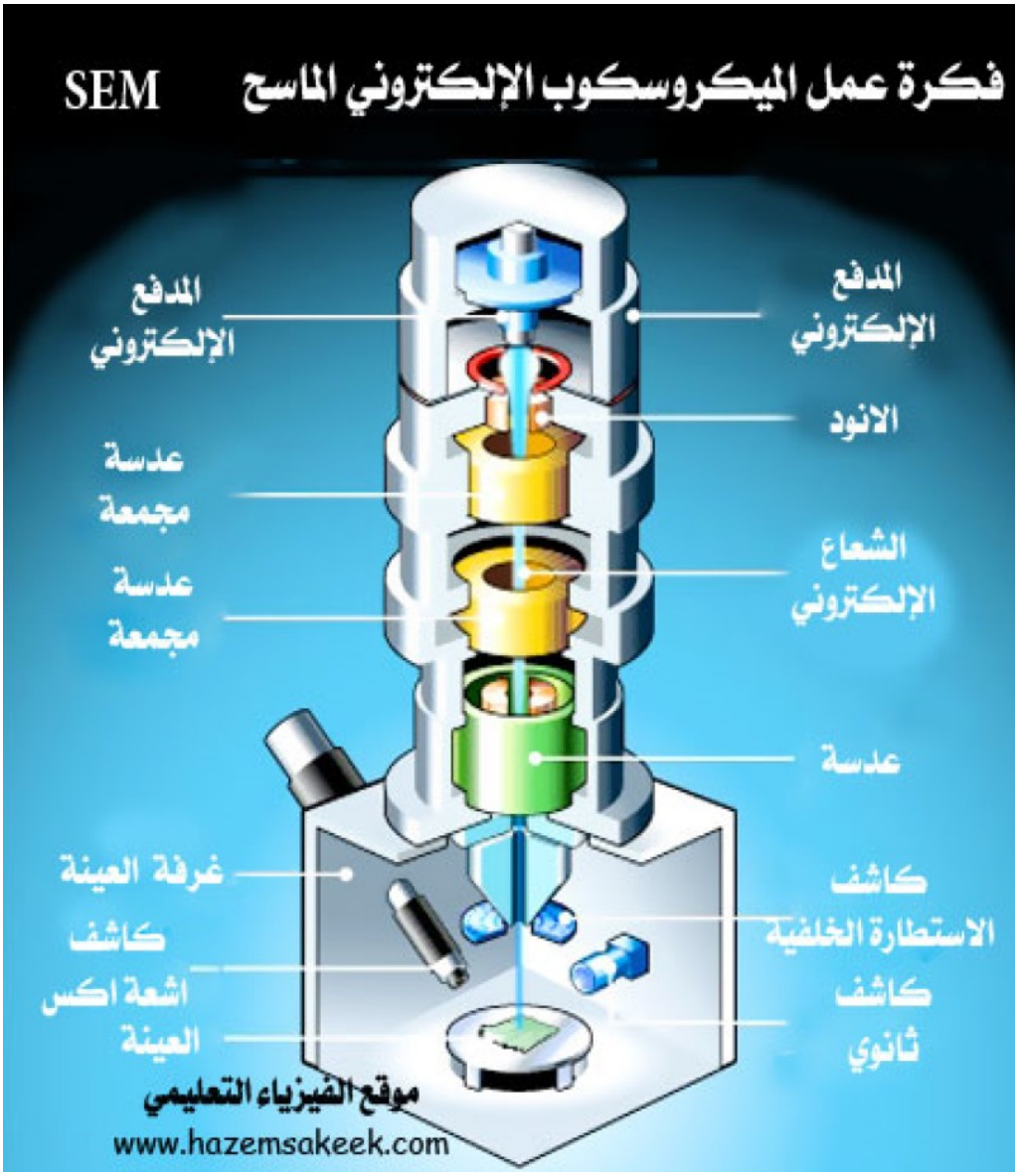
تطور جهاز SEM بدأ ببطء شديد ولم يظهر بشكل مفاجئ. فعندما تم الكشف عن هذه التقنية لأول مرة في عام 1935، توجه المهتمين لهذه التقنية إلى محترفي التسويق وطلبوا منهم أن يقيموا هذه الجهاز الجديد ومدى أهميته وتقدير مدى احتياج السوق له. وبعد الدراسات والأبحاث المتخصصة صدر تقرير خبراء التسويق والذي لم يكن متفائلا. فقدروا ان الحاجة لمثل هذا الجهاز لن تتجاوز العشرة أجهزة في كل العالم. إلا انه تبين ان تقدير الخبراء لم يكن في محله. ولحسن الحظ لم يثني هذا التقرير العلماء والباحثين من العمل على تطوير هذه التقنية. والآن يصل عدد أجهزة SEM المستخدمة في مختلف المختبرات والمراكز البحثية لأكثر من 50,000 جهاز. والسؤال الآن كيف تمكن هذا الجهاز من الانتشار بهذا القدر بعد ان كانت التوقعات بانه لن يرى النور وأصبح أداة علمية هامة وأساسية.

لسبب بسيط هو أن العلماء قد وصلوا في تطويرهم للميكروسكوب الضوئي إلى أقصى قدرة له. فالميكروسكوب الضوئي موجود منذ عقود من الزمن، ولازلنا نراه في المختبرات المدرسية والمختبرات البحثية، إلا ان اعتماد هذه الأجهزة على الضوء شكل لها عقبة أمام التطور والوصول إلى قدرات تكبيرية كبيرة. فالضوء يميل إلى ان يحيد diffract أو ينحني عن مساره حول حواف العدسات، وهذا السلوك حدد القوة التكبيرية والقدرة التحليلية لها بشكل كبير لا يمكن التغلب عليه عند الوصول إلى أقصى قدرة تكبيرية أو تحليلية لهذه الأجهزة. ونتيجة لذلك بدأ العلماء في تطوير طرق جديدة لفحص العالم المجهري، ففي العام 1932، تم إنتاج أول جهاز ميكروسكوب إلكتروني نافذ transmission electron microscope والذي يعرف بالاختصار TEM وسوف نقوم بشرحه في موضوع منفصل. هذه الأداة توجه شعاع من الإلكترونات خلال العينة التي تفحص ومن ثم يتم عرض الصورة الناتجة على شاشة فلوريسنت. أجهزة TEM تشبه كثيرا أجهزة SEM والتي ظهرت بعد أعوام قليلة من اكتشاف جهاز TEM.

لم يتوقع العلماء بان جهاز SEM ضروريا بوجود جهاز TEM. وقد اتخذ البروفيسور C.W. Oatley في كلية الهندسة بجامعة كامبردج قرارا غير مترددا بتطوير جهاز الميكروسكوب الإلكتروني الماسح. وبالعمل المتواصل والمستمر بإشرافه وبمشاركة زملائه في الكلية وعدد من الطلبة تمكن C.W. Oatley من عرض إمكانيات هذا الجهاز الجديد من قوة تكبيرة وقدرة تحليلية وإظهار صور ثلاثية الأبعاد بجودة عالية. واليوم تستخدم أجهزة SEM بشكل يومي في العديد من التطبيقات من فحص العيوب في أشباه الموصلات في الدوائر الإلكترونية الدقيقة وحتى الكشف عن كيف تعمل الحشرات.

المركبات الأساسية في جهاز الميكروسكوب الالكتروني الماسح SEM

بعد أن تعرفنا على إمكانيات جهاز SEM وتطوره تاريخيا. فإننا الآن أصبحنا جاهزين للتعرف على الأجزاء الأساسية التي يتكون منها هذا الجهاز وكيف تعمل مع بعضها البعض لإظهار الصور الدقيقة والمكبرة. ولكن قبل أن نبدأ في هذا أود أن أوضح إن أجهزة SEM عديدة ومتنوعة إلا إنها تتشارك كلها في الأجزاء الأساسية.



المدفع الإلكتروني Electron Gun

المدفع الإلكتروني ليس سلاحا كما يبدو من الاسم إلا انه عبارة عن سيل من الإلكترونات اللازمة لعمل جهاز SEM. المدفع الإلكتروني قد يكون أحد النوعين التاليين: المدفع الحراري وهو الأكثر شيوعا ويعمل من خلال استخدام الطاقة الحرارية في فتيلة وغالبا ما تكون فتيلة من التنجستين مثل تلك الموجودة في المصباح الكهربي لأنها تمتلك نقطة انصهار عالية، وتعمل الفتيلة عند ارتفاع درجة حرارتها نتيجة لمرور تيار كهربي فيها على إرسال فيض من الإلكترونات توجه هذه الإلكترونات إلى العينة المراد فحصها. والنوع الثاني هو مدفع المجال الكهربي، حيث يعمل هذا من خلال إنتاج مجال كهربي كبير يعمل على سحب الإلكترونات من ذرات المادة التي ستنتج الإلكترونات. المدفع الإلكتروني بنوعيه يوضع عادة أما في أعلى الجهاز أو في أسفله ويقوم بإطلاق سيل الإلكترونات على العينة المراد فحصها. هذه الإلكترونات في العادة لا تذهب إلى المكان المطلوب بشكل تلقائي ومن هنا نحتاج إلى توجهها وهذا يقوم به العدسات.

العدسات Lenses

يستخدم جهاز SEM عدسات مثل الميكروسكوب الضوئي لإظهار صور دقيقة ومفصلة. والعدسات في هذه الأجهزة تعمل بشكل مختلف تماما. فهي ليست مصنوعة من الزجاج بل هي عدسات مصنوعة من مغناطيسات قادرة على توجيه مسار الإلكترونات. وبفعل ذلك تقوم هذه العدسات بتوجيه الإلكترونات والتحكم في مسارها، مما يضمن ان تصل الإلكترونات إلى المكان المطلوب بدقة.

غرفة العينة Sample Chamber

غرفة العينة في جهاز SEM هو المكان الذي يتم فيه وضع العينة المراد فحصها. ولان العينة يجب ان تكون ثابتة تماما ولا تتعرض لأي حركة حتى تظهر الصور دقيقة وواضحة، فان غرفة العينة يجب ان تكون قوية ومعزولة عن أي اهتزازات. وفي الواقع، فان أجهزة SEM حساسة للغاية ولهذا يتم تركيب هذه الأجهزة وتثبيتها في الطابق الأرضي في المبنى. وبالإضافة إلى وظيفة غرفة العينة في الحفاظ على العينة ثابتة فإنها أيضا تلعب دورا أساسيا في تحريك العينة بزوايا محددة لفحص أجزاء مختلفة فيها دون الحاجة إلى إعادة تثبيتها في كل مرة يراد النظر إلى جزء أو زاوية مختلفة من العينة.

الكواشف Detectors

هنا قد تعتقد ان الكواشف تشبه العدسة العينية في الميكروسكوب الضوئي إلا ان الأمر أكثر تعقيدا فالكواشف المستخدمة في جهاز SEM ترصد تفاعل سيل الإلكترونات مع العينة بعدة طرق مختلفة. فعلى سبيل المثال كواشف Everhart-Thornley ترصد الإلكترونات الثانوية، وهي تلك الإلكترونات المتحررة من السطح الخارجي من العينة. هذه الكواشف قادرة على إنتاج أدق الصور لسطح العينة. وهناك كواشف أخرى مثل كواشف الإلكترونات ذات الاستطارة الخلفية backscattered electron وكواشف أشعة اكس والتي تمكن العلماء من تحليل العينة ومعرفة المركبات الكيميائية الموجودة في العينة.

مفرغة الهواء Vacuum chamber

يتطلب تشغيل جهاز SEM العمل في الفراغ حيث ان الإلكترونات يمكن ان تصطدم بجزئيات الهواء ولا تصل إلى العينة إضافة إلى ان هذه الإلكترونات قد تدفع جزئيات الهواء لان تتفاعل مع سطح العينة وبالتالي إفساد العينة وتغير ملامحها.

وكما هو الحال في العديد من الأجهزة فان SEM ليس جهاز يعمل من خلال جمع هذه الأجزاء فقط، ولمعرفة كيف يظهر SEM الصور تابع عزيزي القارئ القراءة

كيف يعمل جهاز الميكروسكوب الالكترونى SEM؟

يمكن تشبيه فكرة عمل جهاز SEM بآلة نسخ المفاتيح. فعندما تطلب نسخة إضافية لمفتاح من صانع المفاتيح فانه يقوم بوضع المفتاح الأصلي في مكان وتقوم الماكينة

بتتبع التفاصيل الدقيقة للمفتاح وتضعها على المفتاح الخام لينتج في النهاية نسخة طبق الأصل عن المفتاح الأصلي. لاحظ أن النسخ لا يحدث في نفس اللحظة إنما يتم على شكل تتبع لطرف وتطبيقه على الطرف الأخر. يمكنك الآن أن تتخيل العينة تحت الفحص هي المفتاح الأصلي. يأتي هنا دور جهاز SEM في استخدام شعاع الإلكترونات الناتج عن المدفع الإلكتروني وتوجيهه إلى العينة ومسح سطح العينة ليقوم بعمل نسخة طبق الأصل ولكن هنا تظهر لك النسخة على شاشة تلفزيون. وبدلا من إن يقوم الشعاع الإلكتروني بمسح سطح العينة في بعد واحد فانه يقوم بمسح ثلاثي الأبعاد لينتج لك صورة ثلاثية الأبعاد بكل التفاصيل من تجاويف وخدوش وشقوق.

عندما يمسح الشعاع الإلكتروني سطح العينة فانه يتفاعل مع السطح وينتزع إلكترونات من سطح العينة بشكل محدد. هذه الإلكترونات المنتزعة يتم كشفها بواسطة الكاشف عن طريق جذب الإلكترونات المتشتتة وبالاعتماد على عدد الإلكترونات التي تصل إلى الكاشف، فإنها تسجل درجة معينة من مستوى الإضاءة على الشاشة. وباستخدام مجسات إضافية يتم الكشف عن الإلكترونات المتشتتة بالانعكاس عن سطح العينة backscattered وكذلك أشعة اكس المنبعثة عن العينة. نقطة بنقطة وسطر بسطر ويتم تكوين الصورة عن العينة الأصلية ومن هنا جاء اسم الجهاز بأنه جهاز ميكروسكوب الكتروني ماسح والآن أصبحنا نعرف لماذا أطلق عليه اسم الماسح.

بالطبع لا يمكن أن يقوم جهاز SEM بعمله بدون ان يتم التحكم في حركة الشعاع الإلكتروني والذي يتحكم فيه من خلال المجال المغناطيسي باستخدام فرق جهد متغير، للتحكم في تحريك شعاع الإلكترونات على العينة. وتقوم ملفات توليد المجال المغناطيسي بإنتاج المجال المغناطيسي اللازم لمسح الشعاع الإلكتروني بشكل دقيق ذهابا وإيابا على العينة. وإذا أراد الباحث أن يزيد قوة التكبير فانه يقوم بجعل الشعاع الإلكتروني يقوم بالمسح على منطقة أصغر على العينة.

تشغيل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM

قبل ان يقوم الباحثون بالحصول على الصور من جهاز SEM ولنفترض صور عن بعوضة، فان عليهم ان يجهزوا البعوضة مسبقا لتكون جاهزة كعينة للفحص بالجهاز. لان جهاز SEM لا يشبه الميكروسكوب الضوئي، فهو يعمل في الفراغ ويعتمد على المجالات المغناطيسية فان تحضير العينة قد يكون أمرا معقدا بعض الشيء. يبدأ الباحثون بتنظيف العينة من أي غبار أو عوالق. وبعد أن تتم عملية التنظيف يتم وضع العينة على الحامل الخاص بجهاز SEM إذا كانت العينة موصلة للكهرباء. وفي

عندما يمسح الشعاع الإلكتروني سطح العينة فانه يتفاعل مع السطح وينتزع إلكترونات من سطح العينة بشكل محدد. هذه الإلكترونات المنتزعة يتم كشفها بواسطة الكاشف عن طريق جذب الإلكترونات المتشتتة وبالاعتماد على عدد الإلكترونات التي تصل إلى الكاشف، فإنها تسجل درجة معينة من مستوى الإضاءة على الشاشة. وباستخدام مجسات إضافية يتم الكشف عن الإلكترونات المتشتتة بالانعكاس عن سطح العينة backscattered وكذلك أشعة اكس المنبعثة عن العينة. نقطة بنقطة وسطر بسطر ويتم تكوين الصورة عن العينة الأصلية ومن هنا جاء اسم الجهاز بأنه جهاز ميكروسكوب الكتروني ماسح والآن أصبحنا نعرف لماذا أطلق عليه اسم الماسح.

بالطبع لا يمكن أن يقوم جهاز SEM بعمله بدون ان يتم التحكم في حركة الشعاع الإلكتروني والذي يتحكم فيه من خلال المجال المغناطيسي باستخدام فرق جهد متغير، للتحكم في تحريك شعاع الإلكترونات على العينة. وتقوم ملفات توليد المجال المغناطيسي بإنتاج المجال المغناطيسي اللازم لمسح الشعاع الإلكتروني بشكل دقيق ذهابا وإيابا على العينة. وإذا أراد الباحث أن يزيد قوة التكبير فانه يقوم بجعل الشعاع الإلكتروني يقوم بالمسح على منطقة أصغر على العينة.

تشغيل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح SEM

قبل ان يقوم الباحثون بالحصول على الصور من جهاز SEM ولنفترض صور عن بعوضة، فان عليهم ان يجهزوا البعوضة مسبقا لتكون جاهزة كعينة للفحص بالجهاز. لان جهاز SEM لا يشبه الميكروسكوب الضوئي، فهو يعمل في الفراغ ويعتمد على المجالات المغناطيسية فان تحضير العينة قد يكون أمرا معقدا بعض الشيء. يبدأ الباحثون بتنظيف العينة من أي غبار أو عوالق. وبعد أن تتم عملية التنظيف يتم وضع العينة على الحامل الخاص بجهاز SEM إذا كانت العينة موصلة للكهرباء. وفي

حالة أن تكون العينة غير موصلة للكهرباء يتم تغطية العينة بمادة موصلة مثل الذهب أو البلاتينيوم من خلال عملية تعرف باسم الطلاء بالانتزاع sputter coating وهي تقنية تستخدم في إنتاج الأغشية الرقيقة. وهذه التقنية تطبق طبقة رقيقة على العينة تجعلها موصلة كهربائيا بالأرضي لتمنع العينة من ان تصاب بالضرر أثناء الفحص بواسطة الشعاع الإلكتروني الموجه عليها.

وحيث ان العينة سوف توضع في الجهاز وسوف تتعرض لضغط منخفض عند سحب الهواء من الجهاز ليعمل في الفراغ فان العينة تخضع لمزيد من التحضير لضمان أن تبقى العينة متماسكة في ظل هذه الظروف الحرجة. فالعينات البيولوجية على سبيل المثال تجفف قبل أن توضع في جهاز SEM. وإذا لم يتم ذلك فان الضغط المنخفض سوف يجعل الماء في العينة يتبخر بسرعة مما يتسبب في إفساد العينة وتغير ملامحها. بعض العينات الأخرى يتم تجميدها قبل الفحص، وهناك عينات يتم معالجتها كيميائيا حتى تتمكن من البقاء متماسكة في عملية التكبير.

الباحثون مثلهم مثل المصورون لديهم الكثير من أدوات التحكم في الصورة الناتجة. مثل التكبير والتبئير والتباين والوضوح هذه كلها أدوات أساسية للحصول على صور واضحة ويتم التحكم فيها من خلال مفاتيح خاصة على لوحة تحكم الجهاز. وأجهزة SEM الحديثة التي دمج فيها أجهزة الحاسوب لتمكن الباحثون من التحكم في متغيرات الصورة من خلال برامج خاصة جعل من استخدام أجهزة SEM أكثر سهولة من قبل.

وفي النهاية يجب اتخاذ بعض إجراءات الوقاية والسلامة عند تشغيل هذه الأجهزة. فعند عمل هذه الأجهزة فانه ينتج عنها صدور أشعة اكس عندما تصطدم الإلكترونات بالعينة وكما نعلم فان أشعة اكس ضارة على الإنسان إلا انه لا يجب عليك القلق من التعرض لأشعة اكس هذه لان العينة تكون معزولة تماما وأشعة اكس المتولدة لا تصل للشخص المشغل للجهاز، وعادة ما يرفق تعليمات خاصة يتوجب إتباعها قبل تشغيل الجهاز وهذه التعليمات تقع ضمن سياسة الوقاية والسلامة المتبعة في المؤسسة وتختلف حسب نوع وموديل جهاز SEM.

مقاطع فيديو على اليوتيوب توضح فكرة عمل جهاز الميكروسكوب الالكتروني الماسح.

http://www.youtube.com/watch?v=sFSFpXdAiAM

http://www.youtube.com/watch?v=fToTFjwUc5M

طرق تكوين الصورة Imaging methods

تستخدم طرق تكوين الصورة في جهاز TEM المعلومات التي تكون في الأمواج المصاحبة للإلكترونيات والناتجة من تفاعلها مع العينة. وتسمح عدسات الإسقاط بتوجيه أمواج الإلكترونات وتوزيعها على شاشة العرض. وتعبر شدة الإضاءة التي تظهر على شاشة العرض عن متوسط سعة الدوال الموجية للإلكترونات النافذة من العينة.

وبالتالي تم استخدام عدة طرق للحصول على الصورة لتحسين أمواج الالكترونات التي تنفذ من العينة والحصول منها على معلومات مفيدة. تعتمد الصور المتكونة على سعة الشعاع الالكتروني وكذلك على طور هذه الالكترونات التي تستخدم في حالة التكبير لدرجات عالية. التحليل العالي للعينة يتطلب ان تكون العينة رقيقة للغاية لتنفذ منها الالكترونات بطاقة عالية، وعندها لا تمتص العينية أية الكترونات تذكر وبالتالي لن تغير من سعة الموجة الالكترونية ولكن تعدل من طورها. ومن هنا نستنتج ان الصور تتكون اما من خلال التغير الناتج على سعة موجة الالكترونات عند نفاذها من العينة او من خلال التغير في طور هذه الامواج.

إظهار التباين Contrast formation

إظهار التباين في جهاز TEM يعتمد بشكل أساسي على نمط تشغيل الجهاز. تستخدم تقنيات معقدة لإظهار الصورة تعتمد على تغير قوة العدسة وكل نمط تشغيل له اعدادات خاصة بقوة العدسات المستخدمة. انماط التشغيل المختلفة هذه تستخدم في تميز المعلومات التي نحصل عليها من الفحص وهذا يعتمد على اهتمام الباحث والنتائج التي يرغب في الحصول عليها.

نمط التشغيل المجال الساطع Bright field

يعتبر هذا النمط الاكثر استخداما في جهاز TEM وهو نمط صور المجال الساطع. تتكون الصورة في هذا النمط من خلال امتصاص الالكترونات في العينة. المناطق السميكة من العينة أو المناطق التي تحتوي على عدد ذري كبير تظهر معتمة في حين المناطق الاقل سمكا أو التي تحتوي على عدد ذري قليل تظهر مضيئة، ومن هنا جاء اسم هذا النمط.

مبادىء ودوائر التيار المستمر

الكهرباء التيارية

التيار الكهربي المستقر

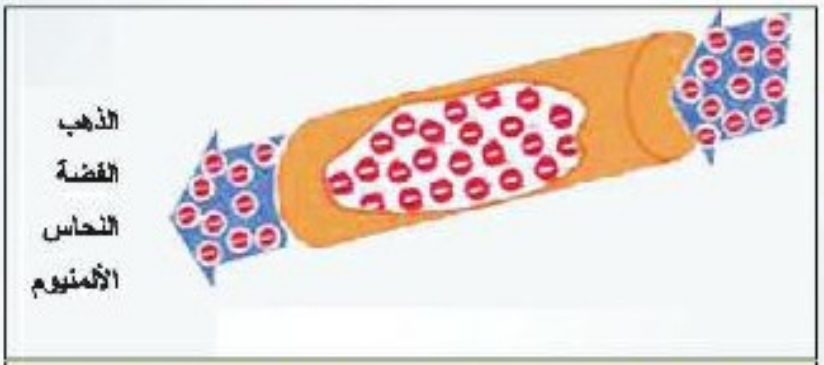
Steady Electric Current

● التيار الكهربي ● التوصيل الكهربي والمقاومات ● الطاقة والقدرة وقانون جول في دوائر التيار المستمر ● القوة الدافعة الكهربية والمقاومة الداخلية ● الدوائر الكهربية المركبة ● تيارات الشحن والتفريغ للمكثف ● قنطرة ويتستون والقنطرة المترية ● قنطرة كاري فوستر ● قنطرة كلفين المزدوجة ● مقياس فرق الجهد واستعمالاته ● القوة الدافعة الكهربية الحرارية ● تأثيرات سيبك وبلتير وطومسون ● القوة الدافعة الحرارية والديناميكا الحرارية ● الازدواج الحراري ودرجة الحرارة ● مسائل.

1-2-1 النواقل والعوازل

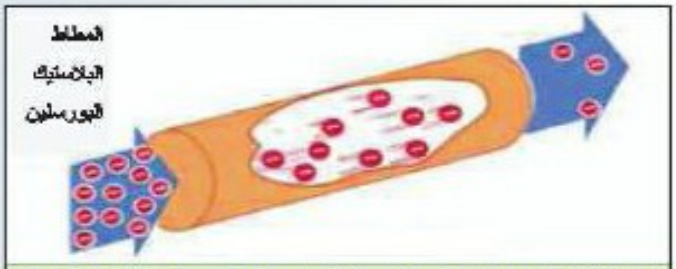
يتم نقل وتوزيع القدرة الكهربائية بوساطة نواقل من أنواع ومقاسات مختلفة. تتكون هذه النواقل من قلب وغلاف. فالقلب هو مادة ناقلة للكهرباء، والغلاف هو مادة عازلة للكهرباء. وتقسم المواد من حيث ناقليتها للتيار الكهربائي إلى ثلاثة أقسام، هي:

أ. **المواد الناقلة (*Conductors*):** هي المواد التي تسمح بمرور التيار الكهربائي عبرها مثل المعادن بمختلف أنواعها. ويرجع السبب في ذلك إلى تركيبها الذري، حيث تحتوي على عدد كبير من الإلكترونات الحرة القابلة للحركة تحت تأثير قوة خارجية كمصدر جهد كهربائي أو بطارية، كما هو



الشكل (1-8) الإلكترونات الحرة القابلة للحركة في ناقل

موضح في الشكل (1 – 8).



الشكل (1-9) مادة عازلة ويظهر فيها عدد قليل من الإلكترونات الحرّة

للمواد العازلة أهمية كبيرة في الأنظمة الكهربائية نظراً لاستعمالاتها المتعددة. فمثلاً، يستخدم البلاستيك في تغطية الأسلاك الكهربائية لحماية الإنسان من الصدمة الكهربائية.

ج. أنصاف النواقل (*Semiconductors*):

هي مواد وسط بين المواد العازلة والمواد الناقلة، أي إنها في حالتها النقية عند درجة حرارة الصفر المطلق تكون عازلة للكهرباء ويتم التحكم بناقليتها عن طريق إضافة بعض الشوائب إليها. ولأنصاف النواقل أهمية خاصة في مجال الهندسة الإلكترونية الحديثة حيث تستخدم في صناعة جميع العناصر الإلكترونية مثل الثنائيات الترانزستورات والدارات المتكاملة. ومن أهم المواد نصف الناقلة المستخدمة في هذا المجال: السيليكون والجرمانيوم.

2-2-1 التيار الكهربائي (Electrical Current)

التيار الكهربائي هو حركة موجّهة للإلكترونات الحرة من نقطة إلى أخرى عبر ناقل. ولكي تتحرك هذه الإلكترونات عبر الناقل، لابد أن تؤثر عليها قوة خارجية. ونحصل على هذه القوة من مصدر الاستطاعة الكهربائية. وأحد هذه المصادر هو البطارية العادية.

تستخدم البطارية " التفاعل الكيميائي " لتوليد زيادة في عدد الإلكترونات عند أحد القطبين، ونقص في عددها عند القطب الآخر. لذلك يطلق على القطب الأول اسم " **القطب السالب** " ويرمز له بإشارة "−" . ويطلق على القطب الثاني اسم " **القطب**

يبين الشكل (1 – 10) سلك نحاس موصلاً بقطب البطارية.

الشكل (1-10) حركة الإلكترونات

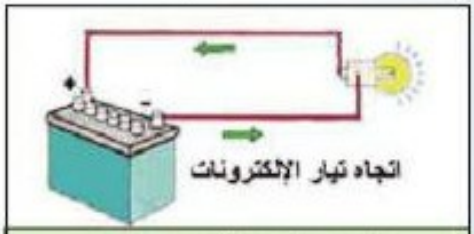
لا يمكن عملياً وصل سلك بين قطبي البطارية بشكل مباشر، لأن ذلك يؤدي إلى مرور تيار كبير وتفريغ سريع للبطارية، مما يؤدي إلى تلفها، ولقد وضع هذا المثال فقط لتوضيح مفهوم سريان التيار الكهربائي.

وبالتمعّن في هذا الشكل يلاحظ بأن الإلكترونات الحرة تتنافر مع القطب السالب للبطارية، في حين يقوم القطب الموجب بجذبها إليه. وبالنتيجة تتحرك الإلكترونات الحرة من القطب السالب إلى القطب الموجب عبر السلك. إن هذه الحركة الموجّهة للإلكترونات الحرة تسمى ' **سريان التيار الكهربائي** ' ويقال في هذه الحالة إن هناك تياراً كهربائياً يمر في السلك.

عندما تدخل الإلكترونات الحرّة الطرف الموجب للبطارية، فإن الأيونات الموجبة تجذبها ولاستمرار مرور التيار الكهربائي، يستمر التفاعل الكيميائي داخل البطارية ويطلق باستمرار إلكترونات حرة وأيونات موجبة جديدة.

3-2-1 اتجاه التيار الكهربائي

لاحظنا في الشكل (1 – 10) بأن الإلكترونات تتحرك عبر الناقل من الطرف السالب للبطارية إلى الطرف الموجب، وبالتالي يكون اتجاه التيار (تيار الإلكترونات) من القطب السالب إلى القطب الموجب للبطارية كما هو مبين في الشكل (1 – 11).



الشكل (1-11) اتجاه التيار

لقد اصطلح على أن يكون اتجاه مرور التيار الكهربائي في الدارة خارج البطارية من القطب الموجب إلى القطب السالب لها كما هو مبين في الشكل (1 – 12) ، أي بعكس اتجاه سريان الإلكترونات. واتجاهه داخل البطارية من القطب السالب إلى القطب الموجب.

الشكل (1-12) اتجاه التيار

4-2-1 شدة التيار الكهربائي (Current Intensity)

تبيّن في الفقرات السابقة بأن التيار الكهربائي هو إلكترونات حرة تتدفق عبر ناقل في اتجاه معين. فإذا تدفق عدد قليل من الإلكترونات تكون شدة التيار منخفضة أما إذا تدفق عدد كبير من الإلكترونات تكون شدة التيار مرتفعة. وتعرّف شدة التيار الكهربائي بأنها كمية الشحنة الكهربائية التي تعبر سطحاً (مقطعاً) معيناً في الناقل في وحدة الزمن (الثانية) أي معدل تدفق الشحنة الكهربائية، وبالتالي:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

حيث:

I شدة التيار الكهربائي.

ΔQ مقدار تغير الشحنة الكهربائية.

Δt مقدار تغير الزمن.

تقاس شدة التيار الكهربائي (I) بواحدة **الأمبير** ويرمز لها بالرمز [A] نسبة إلى العالم أندريه ماري أمبير. والأمبير هو بالتعريف :

شدة تيار كهربائي يستطيع في زمن مقداره ثانية واحدة أن يمرر في دارة كمية من الكهرباء تساوي كولوناً واحداً.

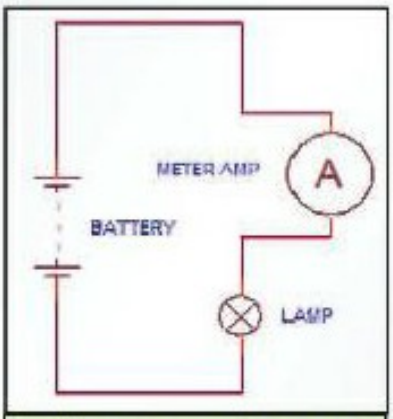
وللأمبير **أجزاء** نذكر منها:

- الميلي أمبير [mA] ويساوي: $1\,[mA\,]=10^{-3}\,[A\,]$
- الميكرو أمبير [μA] ويساوي: $1\,[\mu A\,]=10^{-6}\,[A\,]$

ومضاعفات نذكر منها:

- الكيلو أمبير [KA] ويساوي: $1\,[KA\,]=10^{-3}\,[A\,]$

تقاس شدة التيار في الدارات الكهربائية بمقياس خاص يدعى مقياس الأمبير ويرمز له بدائرة بداخلها الحرف (A). ويجب أن يوصل جهاز قياس شدة التيار على التسلسل مع العنصر المراد قياس شدة التيار المار فيه كما في الشكل (1 – 13)



الشكل (1-13) توصيل مقياس الأمبير

تذكّر

أنه يجب توصيل مقياس الأمبير على التسلسل مع العنصر المراد قياس شدة التيار المار فيه.

5-2-1 فرق الجهد الكهربائي والقوة المحركة الكهربائية

إن أهم شروط سريان التيار الكهربائي هو وجود قوة مؤثرة خارجية تجبر الإلكترونات الحرة (الشحنات) على التحرك في اتجاه معين عبر الناقل. وكما ذكرنا سابقاً، يمكن أن نحصل على هذه القوة من مصادر التغذية الكهربائية كالبطاريات والخلايا الغلفانية والمولدات. وتسمى هذه القوة بأسماء عدة مختلفة: القوة المحركة الكهربائية، وفرق الجهد، والجهد الكهربائي. ومع اختلاف هذه المسميات إلا أنها تقاس بواحدة " **الفولت** " ويرمز لها بالرمز ***[V]***. ويمكن تعريفها بأنها القوة التي تجبر الإلكترونات على التحرك في اتجاه معين عبر الناقل. أي تسبب سريان التيار الكهربائي.

أ. فرق الجهد الكهربائي

ينشأ فرق الجهد الكهربائي عند وجود فرق في كمية الشحنات الكهربائية بين نقطتين في دارة كهربائية.حيث تنتقل الإلكترونات من المنطقة الغنية بالإلكترونات إلى المنطقة التي تعاني من نقص فيها. فالبطارية مثلاً، لديها طرف سالب غني بالإلكترونات الحرة، وطرف موجب فقير فيها. ومن أجل أن تتعادل الشحنات، تحاول الإلكترونات الحرة الموجودة عند الطرف السالب الحركة نحو الطرف الموجب. وهذا يعني وجود فرق جهد بين الطرف الموجب والطرف السالب للبطارية. وإذا وصلنا طرفي البطارية بناقل من النحاس مثلاً، فإنه يتشكل ممر للتيار بين طرفي البطارية. فتتحرك الإلكترونات الحرة من الطرف السالب إلى الطرف الموجب نتيجة لوجود فرق الجهد.

ب. القوة المحركة الكهربائية (*EMF*)

يبيّن الشكل (1 – 12) بطارية كهربائية متصلة بحمل خارجي (مصباح). حيث يمر التيار الكهربائي داخل البطارية من القطب السالب إلى القطب الموجب، أما في الحمل الخارجي، فيمر التيار الكهربائي من القطب الموجب ذي الجهد الأعلى إلى القطب السالب ذي الجهد الأقل. ولكي تتحرك الشحنة دورة كاملة عليها التغلب على مقاومة الحمل وعلى المقاومة الداخلية للبطارية، ولتحقيق ذلك تبذل البطارية على هذه الشحنة عملاً يمكنها اتمام دورتها في الدارة الكهربائية .

إن مقدار العمل المبذول من المنبع الكهربائي لنقل شحنة موجبة اصطلاحية مقدارها (1) كولون خلال الدارة الكلية (داخل المنبع وخارجه) يسمى القوة المحركة الكهربائية للمنبع الكهربائي وتقاس بوحدة الفولت.

إن مصطلح " **القوة المحركة الكهربائية** " يستخدم عادةً للتعبير عن فرق الجهد بين طرفي المنبع الكهربائي بدون حمل خارجي (أي في حالة عدم مرور تيار)، وذلك لتجنب حساب هبوط الجهد على المقاومة الداخلية للمنبع الكهربائي، ويرمز للقوة المحركة الكهربائية بالرمز (EMF).

الكسندر فولتا (1745—1827) فيزيائي إيطالي. اشتهر باكتشافاته الكهربائية ومنها خلية فولتا "Pile Volta" كما قام بقياس فرق الجهد الكهربائي وسميت وحدة قياس الجهد الكهربائي (الفولت) باسمه ورمزها [V].

6-2-1 الفولت

الفولت: هو وحدة قياس فرق الجهد، ويرمز له بالحرف (V) ، وبالتعريف فإن (1) فولت هو فرق الجهد اللازم لتحريك تيار شدته(1) أمبير عبر ناقل مقاومته (1) أوم، وأجزاء الفولت هي:

الميلي فولت $[mV]$:

$$1[mV]=10^{-3}[V]$$

الميكروفولت $[\mu V]$

$$1[\mu V]=10^{-6}[V]$$

أما مضاعفات الفولت فهي :

الكيلو فولت $[KV]$:

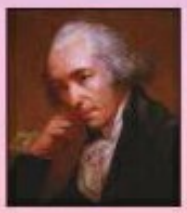
$$1[KV]=10^{+3}[V]$$

يقاس فرق الجهد في الدارات الكهربائية بجهاز خاص يدعى الفولتميتر ويرمز له بدائرة داخلها الحرف (V). والجدير بالذكر أن جهاز قياس فرق الجهد (الفولتميتر)، يوصل على التفرع مع الحمل أو المنبع المراد قياس فرق الجهد بين طرفيه كما في الشكل 14) -1).

الاستطاعة الكهربائية

الكهرباء هي أحد أشكال الطاقة، وكما هو معروف، فإن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث، وإنما تتحول من شكل إلى آخر. ويمكن إنتاج الطاقة الكهربائية بتحويل مختلف أشكال الطاقة الميكانيكية والكيميائية والضوئية والحرارية إلى طاقة كهربائية. كما تستخدم الأجهزة الكهربائية لتحويل الطاقة الكهربائية إلى أشكال أخرى من الطاقة المفيدة مثل الطاقة الميكانيكية، والكيميائية، والضوئية، والحرارية.

1-6-1 الاستطاعة الكهربائية



جيمس وات (1819—1736) فيزيائي سكوتلندي. أدخل عدة تحسينات على المحرك البخاري وحصل على عدد من براءات الاختراع في مجال عمل المحرك البخاري وسميت وحدة قياس الاستطاعة الكهربائية (الواط) باسمه ورمزها [W].

الاستطاعة هي مقدار العمل المبذول في واحدة الزمن (ثانية واحدة)، ويرمز لها بالحرف (P) وتقاس بوحدة تسمى " **الواط** " تكريماً للعالم " **جيمس واط** " مخترع الآلة البخارية، ويرمز للواط بالحرف $[W]$.

يبذل منبع الجهد في الدارة الكهربائية قدرة لتحريك الإلكترونات التي تشكل التيار الكهربائي عبر أجزاء الدارة.

تعطى الاستطاعة الكهربائية بالعلاقة الآتية:

الاستطاعة = الجهد × التيار

$$P=V\times I$$

حيث:

- P : الاستطاعة وتقاس بالواط.
- V: الجهد ويقاس بالفولت.
- I : شدة التيار ويقاس بالأمبير.

وبما أن الواط وحدة صغيرة فإنها لا تلائم التطبيقات العملية كافة . لذلك يستخدم لقياس الاستطاعة مضاعفات الواط ويساوي:

- الكيلو واط $[KW]$

$$1[KW]=1000[W]=10^{+3}[W]$$

- الميغا واط $[MW]$

$$1[MW]=1000000[W]=10^{+6}[W]$$

مثال 3:

مصباح كهربائي مقاومته (484) أوم، وجهده (220) فولت. احسب استطاعة هذا المصباح.

الحل:

حساب استطاعة المصباح:

$$P=\frac{V^2}{R}$$

$$P=\frac{(220)^2}{484}=100\ [W]$$

ملاحظة:

تعطى قدرة المحركات والمضخات الكهربائية في بعض الأحيان بوحدة الحصان الميكانيكي، وهي تعادل (746) واط ، ويرمز لها بالحرفين (HP).

$$1\ [HP] = 746\ [W]$$

ومن المناسب أن نتذكر بان الحصان الواحد يساوي 0.75 [KW] تقريباً .

2-6-1 الطاقة الكهربائية المستهلكة (Electrical Energy)

تحسب الطاقة الكهربائية المستهلكة (W) بمعرفة الاستطاعة الكهربائية وزمن استخدامها وفقاً للعلاقة:

$$W = P \times t$$

حيث:

- W الطاقة وتقاس بواحدة الكيلوواط في الساعة ويرمز لها بالرمز [KWh] .
- P الاستطاعة وتقاس بالكيلوواط [KW] .
- t الزمن ويقاس بالساعة [h] .

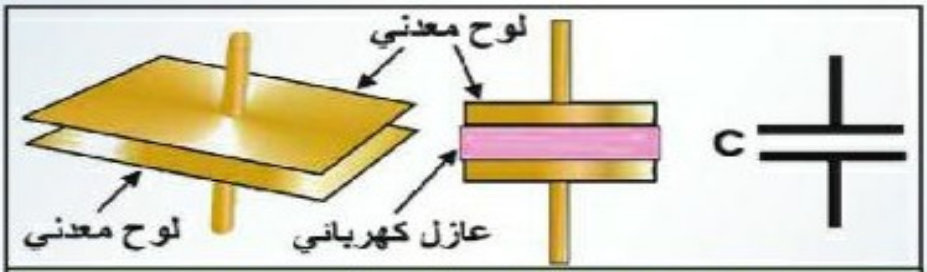
وتحتوي لوحة التوزيع الرئيسية في المنازل والمصانع على عداد لقياس الطاقة الكهربائية المستهلكة.والأجهزة الكهربائية الأكثر استهلاكاً للطاقة الكهربائية هي الأجهزة ذات القدرة العالية مثل أجهزة التسخين والتدفئة وتكييف الهواء.

المكثفات الكهربائية

المكثف هو عنصر كهربائي يقوم باختزان الطاقة الكهربائية أثناء عملية الشحن على شكل طاقة كهربائية وتفريغها (إعادتها) أثناء عملية التفريغ.

1-8-1 تركيب المكثف

يتكون المكثف في أبسط أشكاله من لبوسين (لوحين) معدنيين متوازيين، تفصل بينهما مادة عازلة، مثل الهواء أو الورق المشبع بالزيت أو مواد من البلاستيك أو الميكا أو مواد من السيراميك. ويوصل بكل لبوس من لبوسي المكثف طرف توصيل. ويبين الشكل (1 – 57) طريقة تركيب المكثف بأبسط أشكاله ورمزه في الدارات الكهربائية.



الشكل (1-57) تركيب المكثف الكهربائي ورمزه

2-8-1 آلية عمل المكثف

سنناقش في هذه الفقرة آلية عمل المكثف.

عندما يكون المفتاح (S1) غير موصول يكون جهد المنبع غير مطبق على المكثف، لذا يوجد عدد متماثل من الإلكترونات الحرة على كل لوح، وبالتالي لا يوجد فرق جهد بين لبوسي المكثف كما في الشكل (1-58-A).

عند إغلاق المفتاح (S1) تقوم البطارية بجذب الإلكترونات الحرة الموجودة على اللبوس العلوي للمكثف باتجاه قطبها الموجب، كما تقوم بدفع كمية متساوية من الإلكترونات من قطبها السالب نحو اللبوس السفلي للمكثف ونتيجة لذلك يمر تيار في

3-8-1 السعة الكهربائية للمكثف (C)

هي خاصية للمكثف وتحدد مقدار الشحنة الكهربائية التي يستطيع أن يختزنها مكثف عند تطبيق جهد محدد بين طرفيه وتعطى بالعلاقة:

$$C = \frac{Q}{V}$$

حيث:

- C سعة المكثف وتقاس بالفاراد [F]
- Q شحنة المكثف وتقاس بالكولون [C] .
- V فرق الجهد بين طرفي المكثف ويقاس بالفولت [V] .

الفاراد [F]: هو سعة مكثف إذا شحن بشحنة مقدارها (1) كولون كان فرق الجهد بين طرفيه (1) فولت.

ملاحظة(1)

يقصد بشحنة المكثف قيمة شحنة أحد لبوسيه الموجبة أو السالبة (كقيمة مطلقة) لأنهما متساويتان.

ملاحظة (2)

إن قيمة الفاراد قيمة كبيرة وغير موجودة عملياً ولذلك تستعمل في التطبيقات العملية أجزاء الفاراد، وهي:

الميكروفاراد [µF]: $1[\mu F] = 1 \times 10^{-6} [F]$

النانو فاراد [nF]: $1[nF] = 1 \times 10^{-9} [F]$

البيكوفاراد [PF]: $1[PF] = 1 \times 10^{-12} [F]$

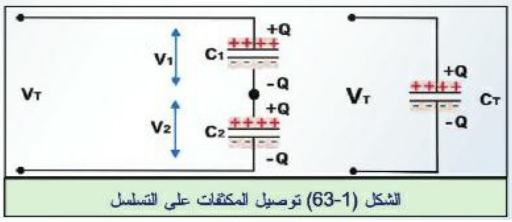
4-8-1 الطاقة الكهربائية المختزنة في المكثف (W_C)

يخزن المكثف الطاقة الكهربائية . وتتناسب الطاقة المختزنة في المكثف طرداً مع حاصل جداء قيمة السعة ومربع قيمة فرق الجهد بين طرفي المكثف، وتعطى بالمعادلة الآتية:

$$W_C = \frac{1}{2} C V^2$$

حيث :

- W_C قيمة الطاقة المختزنة وتقاس بالجول [J] .
- C السعة وتقاس بالفاراد [F] .
- V الجهد بين طرفي المكثف ويقاس بالفولت [V] .



الشكل (1-63) توصيل المكثفات على التسلسل

$$W_C = \frac{1}{2}CV^2$$

حيث : W_C قيمة الطاقة المختزنة وتقاس بالجول $[J]$.

C السعة وتقاس بالفاراد $[F]$.

V الجهد بين طرفي المكثف ويقاس بالفولت $[V]$.

يمكن تقسيم المكثفات إلى قسمين أساسيين:

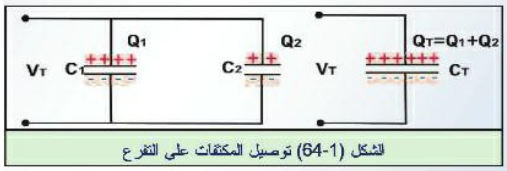
- مكثفات ثابتة القيمة.
- مكثفات متغيرة القيمة.

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

$$C_T V_T = C_1 V_T + C_2 V_T$$

وبما أن الجهد المطبق في دارة التفرع يساوي جهد المنبع، فيمكن كتابة العلاقة السابقة كما يلي:

$$C_T = C_1 + C_2$$



الشكل (1-64) توصيل المكثفات على التفرع

وبمعنى آخر، في حالة التوصيل التفرعي لعدة مكثفات، فإن السعة المكافئة تساوي مجموع سعات كل منها.

إذا وصل عدد (n) من المكثفات على التفرع، فإن قيمة السعة المكافئة تعطى بالعلاقة:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n$$

$$V_T = V_1 + V_2$$

$$\frac{Q}{C_T} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

وبما أن الشحنة الكهربائية للمكثفات متساوية فيمكن كتابة العلاقة السابقة كما يلي:

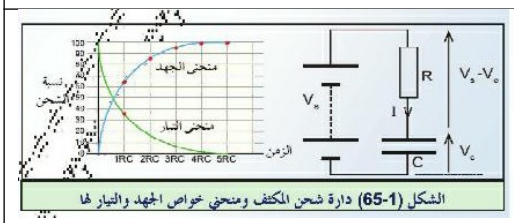
$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

وبمعنى آخر، في حالة التوصيل التسلسلي لعدة مكثفات، فإن مقلوب السعة المكافئة الناتجة يساوي مقلوب كل من السعات المختلفة للمكثفات المنفردة. وتكون السعة المكافئة أقل من سعة أصغر المكثفات في المجموعة.

إذا وصل عدد n من المكثفات على التسلسل، فإن مقلوب قيمة السعة المكافئة تعطى بالعلاقة التالية:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + ... + \frac{1}{C_n}$$

ونلاحظ أن لهذه المعادلة الشكل ذاته الذي كان لمعادلة حساب المقاومات على التفرع.



الشكل (1-65) دارة شحن المكثف ومنحنى خواص الجهد والتيار لها

الثابت الزمني للشحن:

يعرف الزمن اللازم لشحن المكثف إلى أن يصل فرق الجهد بين طرفيه إلى $63\ \%$ من قيمة جهد المصدر بالثابت الزمني لشحن المكثف، وتعطى قيمته بالمعادلة التالية:

$$\tau = RC$$

حيث إن:

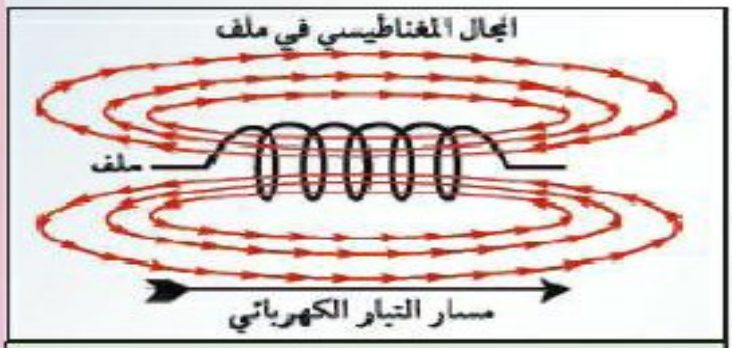
- τ الثابت الزمني بالثانية.
- R المقاومة بالأوم.
- C سعة المكثف بالفاراد.

الـــمـــلـــفـــات

الملفات هي أحد عناصر الدارات الإلكترونية والكهربائية كثيرة الاستخدام، فلا يكاد يخلو منها جهاز إلكتروني كالحاسوب، الراديو، التلفزيون، جهاز الهاتف الثابت والمحمول، ولا جهاز كهربائي كالثلاجة، المروحة والغسالات. ما الملف؟ وما مبدأ عمله؟

1-10-1 الملف (Coil)

عند لف سلك كهربائي معزول على قلب هوائي أو قلب حديدي أو قلب فيرايت (برادة الحديد) أو أي مادة أخرى نحصل على ما يسمى بالملف. عندما يمر تيار كهربائي في سلك، يتولد مجال مغناطيسي حول الملف تتناسب شدته مع شدة التيار الكهربائي المار في الملف كما في الشكل (1 83) .

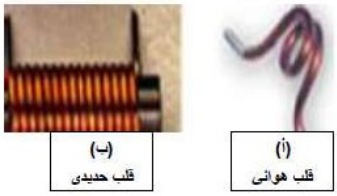


الشكل (1-83) خطوط المجال المغناطيسي حول

وهكذا فإن الملف يعمل على تحويل القدرة الكهربائية إلى قدرة مغناطيسية يختزنها داخل المجال المغناطيسي المحيط به والذي يمكن تركيزه في القلب. عند حدوث تغيير (زيادة أو نقصان) في شدة التيار الكهربائي المار في الملف، تتأثر شدة المجال المغناطيسي المحيط بهذا الملف. فعندما تزداد شدة التيار المار في الملف، تزداد شدة المجال المغناطيسي. وعندما تنخفض شدة التيار تقل شدة المجال المغناطيسي. إن التغير في شدة المجال المغناطيسي يمكن تخيله على شكل وجود خطوط مجال مغناطيسي متحركة تقطع لفات الملف نفسه، وحسب قانون فاراداي فإن هذا يؤدي إلى توليد قوة محركة كهربائية تؤدي بالتالي إلى توليد تيار كهربائي ذي اتجاه يعاكس أي تغير في شدة التيار الأصلي المار في الملف. اتجاه هذا التيار يعطى حسب قانون لينز الذي ينص على أن: **" القوة المحركة الكهربائية التحريضية تولد تياراً يعمل على توليد مجال مغناطيسي يعاكس تأثير المجال المغناطيسي الذي أدى إلى توليد هذا التيار"** .

الملفات

- الملف هو سلك موصل تم لفه علي شكل حلقات دائرية وهو احد أهم عناصر الدائرة الكهربية (دوائر الراديو والتليفزيون دوائر الحاسب وغيرها)
- يتكون الملف عند لف سلك كهربي معزول علي قلب هوائي أو حديدي.



(أ) قلب هوائى

(ب) قلب حديدى

- عند تحريك مغناطيس داخل وخارج الملف سوف ينشأ تيار كهربي يسمي بالتيار الحثي حيث تعرف تلك الظاهرة بالحث الكهرومغناطيسي وسببها تغير المجال المغناطيسي الذي يمر خلال الملف مع الزمن الذي يؤدي الي ظهور قوة دافعة كهربية في الملف.

طرق توليد الجهد أو القوة الدافعة الكهربية (e.m.f: Electromotive Force) بالملفات عن طريق الحث

أولا: جهد الحث بالحركة ثانيا: جهد الحث الناتج عن السكون ثالثا: الجهد المتولد بالحث الذاتي

أولا: جهد الحث بالحركة

طريقة توليد الجهد بتأثير الحركة هو عند تقريب المغناطيس الدائم إلى الملف فانة يتولد جهد يقرأ بجهاز القياس ذو المؤشر وعند توقف الحركة يرجع المؤشر إلى الصفر وأثناء إرجاع المغناطيس يتحرك المؤشر بالاتجاه العكسي حتى تتوقف فيرجع إلى الصفر.

لذلك فإن الجهد يتولد فقط أثناء حركة المغناطيس وعند تثبيت المغناطيس وتحريك الملف بمفرده أيضا يتولد جهد بالملف يكون اتجاهه على حسب اتجاه الحركة. ولا يتكون هذا الجهد عند توقف حركة الملف.

ثانيا: جهد الحث الناتج عن السكون

عند لف عدد كبير من لفات موصل على جزء من قلب حديدي وإيصال البطارية مع مفتاح ولف لفات أقل في طرفي قلب حديدي أخر وتوصيلها بجهاز قياس التيار (الأميتر) وغلق الدائرة نجد انه يمر تيار سريع في الملف الأول مما يولد مجال مغناطيسي يقطع الملف الثاني مكونا بين طرفيه جهد يسبب مرور تيار وبعد ذلك يتوقف مرور التيار.

ثالثا: الجهد المتولد بالحث الذاتي

عند مرور تيار كهربائي في ملف فإنه يتولد في الملف نفسه قوة دافعة كهربية مضادة لاتجاه مصدر الجهد وهذه القوة الدافعة الكهربية (e. m. f) تسمى بجهد الحث الذاتي الذي يعاكس التغير المفاجئ في قيمة التيار الكهربائي المار لأنه عند غلق الدائرة وفتحها عن طريق المفتاح يتكون هذا الجهد فقط أما عند ثبات قيمة التيار المستمر فان القوة الدافعة الكهربية (e. m. f) تساوى صفر.

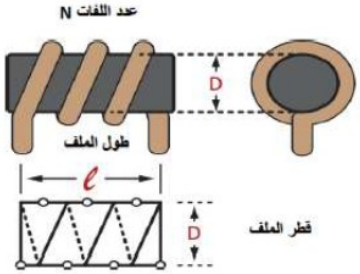
معامل الحث الذاتي (Induction)

عند تغير التيار في دائرة موجود بها ملف كهربائي فان المجال المغناطيسي يتغير. لذلك يتناسب المجال المغناطيسي الذي يقطع ملف نتيجة التيار المار به مع شدة التيار تناسب طردي وثابت التناسب هو معامل الحث الذاتي وهو ما يرمز بالرمز (L) "حث (محاثة) الملف".

حساب حث الملف – محاثة الملف (L):

يتوقف حث الملف (محاثة الملف) على عدة عوامل أساسية:

- طول الملف.
- مساحة مقطع الملف.
- النفاذية المغناطيسية لقلب الملف، عدد اللفات، وفيما يلي وصفا لكل عامل منهم.



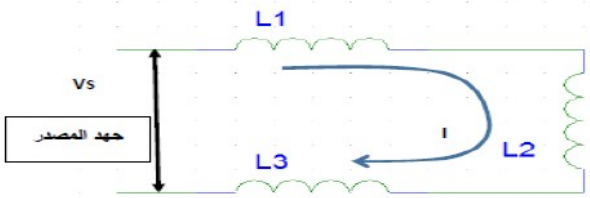
توصيل الملفات

كما إن المقاومة توصل على التوالي والتوازي فكذلك الملفات يتم توصليها على التوالي والتوازي.

توصيل الملفات على التوالي:

يكون الحث الكلي للملفات في التوصيل على التوالي يساوى مجموعها الجبري حسب المعادلة التالية:

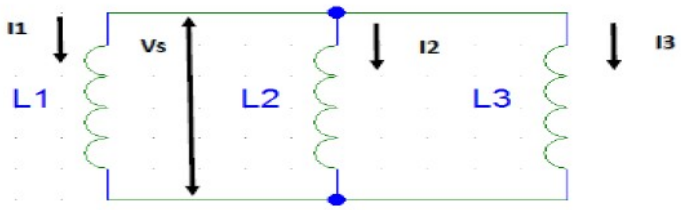
$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_T$$



توصيل الملفات على التوازي:

يكون الحث الكلي للملفات في التوصيل على التوازي يساوى مقلوب مجموعها كالتالي:

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \cdots + \frac{1}{L_n}$$



عدد لفات الملف (N):

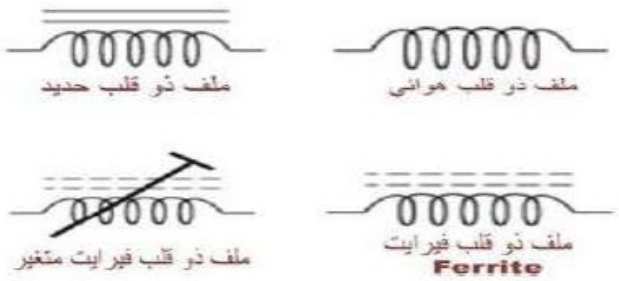
حث الملف (L) يتناسب طرديا مع مربع عدد لفات الملف (N^2)

والصيغة الرياضية التى تحدد حساب حث الملف من العوامل السابقة هى كالتالى:

$$L = \frac{(N^2 * \mu_r * \mu_0 * A)}{l} \quad H$$

أنواع الملفات

يتم تقسيم الملفات حسب نوع القلب (Core) أو الوسط الملفوف عليه الملف وهو كالتالى:



الفيرايت: هي مواد خزفية توصل التيار الكهربائي بشكل ضعيف.

طول الملف (l)

حث الملف (L) يتناسب عكسيا مع طول الملف حيث (l)، ويقاس طول الملف بالمتر (m)

مساحة مقطع الملف (A)

حث الملف (L) يتناسب طرديا مع مساحة مقطع الملف (A)، حيث (A) مساحة مقطع سلك الملف وتقاس بوحدة ال متر٢ (m^2)

النفاذية المغناطيسية (معامل النفاذ المغناطيسي) Permeability هي قيمة مدى إمكانية تدفق خطوط المجال المغناطيسي في وسط ما، وتزداد سهولة تدفق خطوط المجال المغناطيسي بازدياد نفاذيته والعكس صحيح .يتميز الحديد بنفاذية مغناطيسية عالية. تمثل النفاذية المغناطيسية نسبة كثافة التدفق المغناطيسي إلى شدة المجال المغناطيسي. وحدة النفاذية هي هنري لكل متر .

يرمز لنفاذية مادة للمغناطيسية بالرمز μوهي تحدد نفاذية مادة ما للمجال المغناطيسي ، وتختلف قيمتها من مادة إلى مادة .

نفاذية الفراغ للمغناطيسية μ_0

يوصل الفراغ أيضا المجال المغناطيسي،إذاً فله نفاذية مغناطيسية. وتبلغ نفاذية الفراغ المغناطيسية : $(4\pi x10^{-7})$

النفاذية النسبية

النفاذية النسبية relative Permeability ويرمز لها بالرمز μ_r، وهي النسبة بين نفاذية وسط ما أو مادة ما إلى نفاذية الفراغ

$$\mu r = \frac{\mu}{\mu 0}$$

ان المواد الموصلة تحتوى بداخلها على شحنات حرة تتحرك حركة عشوائية غير منتظمة ولكنها عند خضوعها لمجال كهربي تتحرك حركة منتظمة فى اتجاه معين مكونة ما يسمي بالتيار الكهربي . والشحنات الحرة فى حالة الموصلات المعدنية عبارة الكترونات حرة اما فى الموصلات السائلة والغازية فهي ايونات موجبة وايونات سالبة. من المعروف ان التيار الكهربي عبارة عن نوعين اساسيين هما:

- **التيار المستمر(D C):** هو التيار الذي لا يتغير اتجاهه مع الزمن (ثابت القيمة والاتجاه) ونحصل عليه بصفة اساسية من الخلايا الكهروكيميائية (مثل المركم – الجافة – الخلية القلوية)
- **التيار المتردد (AC):** هو التيار الذي يتغير اتجاهه مع الزمن (غير ثابت القيمة والاتجاه) مثل التيار في المنازل

وفي هذا المقرر باذن الله عزوجل سوف نتاول بشيء من التفصيل التيار المستمر وتعريف جميع مركباته وعرض سريع لبعض دوائر الاساسية وسلوك بعض عناصر الكهربية تحت تاثير ذلك النوع من الكهرباء التيارية

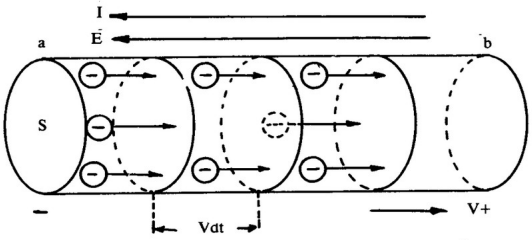
اولى هذه المركبات هى ما يعرف بشدة التيار الكهربي (I) والمعروف بانه كمية الشحنة التى تمر خلال مقطع سلك فى الثانية الواحدة. فمثلا اذا مرت شحنة قدرها فى زمن قدره خلال مقطع السلك فان شدة التيار تعطي بالعلاقة التالية :

$$I=\frac{dq}{dt}$$

وفي النظام العالمي (وهو مستخدم غالبا فى معاملنا الطلابية) فوحدة قياس شدة التيار هى الامبير وهو الكولوم لكل ثانية.

ويعبر عن التيارات الصغيرة بالمللي امبير $1\,mA=10^{-3}\,A$ وبالميكرو امبير $1\,\mu A=10^{-6}\,A$ واتجاه التيار المصطلح هو عكس اتجاه تحرك الشحنات الكهربية السالبة فى الموصلات. وبالاخذ فى الاعتبار اتجاه التيار وعلاقته باتجاه هذه الشحنات فان المعادلة تكتب على الصورة:

$$I=\frac{-dq}{dt}$$



شكل (١-٤): قطعة من سلك موصل منتظم الشكل مساحة مقطعه S يمر به تيار I يتجه إلى اليسار فتحركت الإلكترونات إلى اليمين، لدراسة كثافة التيار وعلاقته بالإلكترونات المتحركة.

وبالاستعانة بالشكل السابق: اذا تعرضت قطعة من سلك موصل منتظم لمجال كهربي شدتة E ومتجه الى اليسار فان الالكترونات ستتحرك الى اليمين. فاذا فرض ان كل الكترون يسير بسرعة ثابتة (سرعة عشوائية) مقدراها u فانه سيقطع مسافة قدرها قدرها udt فى زمن قدره dt. فاذا كانت مساحة مقطع السلك S وكانت n عدد الالكترونات الحرة فى وحدة الحجوم، فان عدد الالكترونات التى تمر من مقطع السلك فى الزمن dt تساوى nSudt . فاذا كانت e تمثل شحنة الالكترون فان الشحنة الكلية التى تمر فى هذه المسافة فى الزمن dt هي:

$$dq=neuSdt$$

$$\therefore I=\frac{dq}{dt}=neus$$

وتعرف كثافة التيار J لموصل ما بانها خارج قسمة التيار على مساحة مقطع الموصل اى ان:

$$J=\frac{I}{S}=neu$$

اما اذا لم يكن التيار موزعا بانتظام فانه يمكن اعتبار مرور التيار خلال مساحة متناهية فى الصغر مقدارها ds وعليه يمكن كتابة كثافة التيار بالصغية التالية:

$$J=\frac{dI}{dS}$$

اى ان كثافة التيار عبارة عن التيار خلال وحدة المساحة العمودية على اتجاه سريان الشحنة.

وتختلف المواد الموصلة بعضها عن بعض فى مقدار كثافة التيار الذى يتكون نتيجة لمجال كهربي E. وتسمي نسبة كثافة التيار الى شدة المجال الكهربي بالتوصيل الكهربي للمادة ويرمز له بالرمز σ اى ان :

$$\sigma=\frac{J}{E}\therefore J=\sigma E$$

وكلما زادت توصيلية مادة ما زادت كثافة التيار لها عند قيمة معينة لشدة المجال الكهربي E ووحدات σ هى امبير /فولت.متر وتبلغ قيمتها بالنسبة للموصلات فى حدود 10^{8}A/V.m اما فى بالنسبة للعوازل الجيدة فى حدود 10^{-13}A/V.m او اقل من ذلك.

ويسمي مقلوب التوصيلية الكهربية للمادة بالمقاومة النوعية للمادة ويرمز لها بالرمز ρ ووحدتها فولت.متر/امبير وتعطى من العلاقة:

$$\rho=\frac{1}{\sigma}=\frac{E}{J}\therefore \rho=\frac{ES}{I}$$

<u>المقاومة وقانون اوم</u>

كما سبق فان التيار ينتج عن حركة الشحنات فى الموصل. فاذا كان لدينا موصلا اسطوانيا معدنيا كما بالشكل السابق. وفرض ان n عدد الالكترونات فى وحدة الحجوم من هذا الموصل وان e شحنة الالكترون فان كل الكترون يتاثر بقوة نتيجة لتسليط المجال E قدرها:

$$F=e.E=ma$$

حيث a هى عجلة الالكترون وm كتلة الالكترون.

اى ان تحت تاثير مجال كهربي E يتسارع الالكترون بعجلة a ويفقد سرعتة عند تصادمه بايونات الموصل وبعد كل تصادم يبدأ الالكترون حركتة من وضع السكون ويتسارع مرة اخرى وتسمي سرعة الالكترونات تحت تاثير المجال السرعة الانسياقية او الانقيادية وتزداد متوسط السرعات الانسياقية للالكترونات الحرة المشتركة فى سريان التيار طرديا مع زيادة المجال الكهربي اى ان:

$$\bar{v}\alpha E\therefore \bar{v}=\mu E$$

وتسمي ثابت التناسب μ قابلية الحركة للالكترونات وهى خاصية من خواص المواد وتكون كبيرة بالنسبة للموصلات الجيدة التوصيل وصغيرة بالنسبة للموصلات ضعيفة التوصيل. ويجب ان نعرف ان السرعة $\bar{v}$ تختلف عن السرعة العشوائية التى تتحرك بها الالكترون داخل الموصل قبل تأثره بالمجال الكهربي.

ويسمي متوسط الزمن بين اصطدامين متتابعين بمتوسط الزمن الحر ويسمي متوسط المسافة بين اصطدامين بمتوسط المسار الحر. ويعتبر هذا التصادم بمثابة قوة تعوق حركة الالكترونات ينتج عنها ما يسمي بمقاومة الموصل.

اكتشف العالم الفرنسي سيمون اوم عام 1825 ان شدة التيار المار فى الموصل تتناسب طرديا مع فرق الجهد بين طرفين الموصل اى ان :

$$V\alpha I \therefore V = const. * I$$

وحيث ان قياس التيار فى الموصل بواسطة اميتر يوصل عل التوالى ويقاس فرق الجهد بالفولتميتر على التوازى بين طرفي الموصل ويجب ان تكون مقاومة اجهزة القياس هذه بحيث لا تغير من قيمة التيار او فرق الجهد المقاسين يمكن وضع المعادلة السابقة على الصورة التالية:

$$V = IR$$

وثابت التناسب رمز له هنا بالرمز R وهو مقدار ثابت تتوقف قيمة على نوع مادة الموصل وابعاده هذا هو الذى يسمي بمقاومة الموصل سالفة الذكر.

وتقاس المقاومة بوحدة الاوم اذا قيس التيار وفرق الجهد بالوحدات العملية الامبير والفولت على التوالى. وعليه يمكن تعريف المقاومة كالتالي:

مقاومة موصل هى قيمة المقاومة التى يلاقيها تيار شدتة 1 امبير يمر فى موصل عندما يكون فرق الجهد بين طرفيه يساوى 1 فولت.

وتتوقف مقاومة موصل منتظم المقطع على طوله L ومساحة مقطعه a وفقا للمعادلة التالية:

$$R = \frac{L}{a}\rho$$

حيث ρ ثابت يتوقف على نوع مادة الموصل ويسمي المقاومة النوعية للموصل والتى سبق ان ذكرها ويمكن ان تعرف كاتالى:

المقاومة النوعية لموصل ما هى الا مقاومة موصل مقدرة بالاوم من هذه المادة طوله 1 سم ومساحتة مقطعه 1سم^2.

<u>القوة الدافعة الكهربية والمقاومة الداخلية</u>

يستمد التيار المار فى دائرة طاقتة من منبع للطاقة الكهربية. وتنتج هذه الطاقة عن تحول الطاقة المختلفة كالكيميائية او الميكانيكية او الحرارية او غيرها الى طاقة كهربية فقد يكون المصدر الكهربي على شكل بطارية مكونة من اعمدة كهربية (تحويل الطاقة الكيمائية الى طاقة كهربية) او مولد كهربي (تحويل الطاقة الميكانيكية الى طاقة كهربية) او ازدواج حراري (تحويل الطاقة احرارية الى طاقة كهربية) او خلية شمسيةاو ضوئية (تحويل الطاقة الضوئية الى طاقة كهربية).

هذا المصدر يعطي قوة دافعة كهربية E تعطى تبعا للمعادلة التالية:

$$P = \frac{dW}{dt} = EI = E\frac{dq}{dt}$$

$$\therefore E = \frac{dW}{dq} = J\text{ جول}/C\text{ كولوم} = volt$$

اى ان القوة الدافعة الكهربية للمصدر هى الطاقة التى تزود بها كل وحدة شحنات تخرج من هذا المصدر وفى حالة دائرة مؤلفة من بطارية قوتها الدافعة الكهربية E ومن مقارمة خارجية R يمكن تقسيم الجهد الكهربي الكلي الذى تمثله القوى الدافعة الكهربية الى قسمين:

1. **الجهد الخارجي:** وهو جزء الجهد الكهربي الكلي الذى يدفع التيار فى الاجهزة الخارجية المتمثله فى المقاومة R وتضيع طاقة قدرها I^2R فى هذا الجزء من الدائرة.
2. **الجهد الداخلي:** وهو جزء الجهد الكهربي الكلي الذى يدفع التيار داخل المصدر الكهربي نفسه وهو المتمثل فى المقاومة الداخلية r ولذلك تضيع جزء آخر من الطاقة قدره I^2r داخل المصدر ذاته.

وتكون الطاقة الكلية المتولدة من المصدر مساوية للطاقة الكلية المفقودة خارجه وداخله اى ان:

$$IE = I^2R + I^2r$$

$$\therefore E = IR + Ir$$

حيث V=IR يمثل فرق الجهد بين قطبي المصدر اى ان:

$$V = E - Ir$$

وفى احيانا كثيرة يمكن اهمال قيمة r بالنسبة الى R وعليه يكون V=E

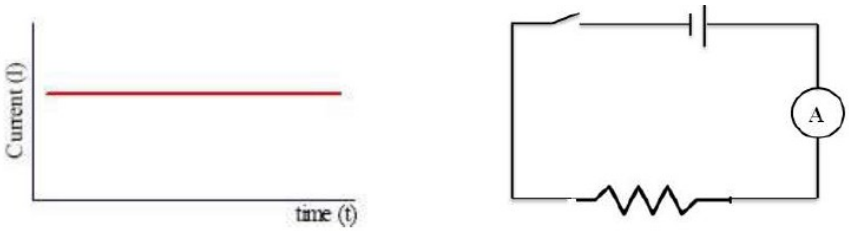
ويمثل المصدر الكهربي فى حالة التيار المستمر بطرفين، يرمز لأحدهما بالعلامة (-) ويعتبر جهده صفرا ويرمز لآخر بالعلامة لموجبة (+) ويعتبر جهدة مساويا للقوة الدافعة الكهربية للمصدر. ويكون اتجاه مرور التيار فى الدائرة الخارجية من الطرف العالي الجهد الى الطرف منخفض الجهد كما ان مروره داخل المصدر لكي يكمل المسار الدائر المغلق فى الاتجاه المضاد اى من الطرف منخفض الجهد الى الطرف عالي الجهد.

- س: فسر وجود مقاومة فى الموصل ؟ مع توضيح اهم العوامل التى تتوقف عليها؟
- س: هل المقاومة النوعية صفة مميزة للمادة ؟ ولماذا؟
- س: عرف كثافة التيار والتوصيل الكهربي للمادة ؟ مع ذكر الارتباط بينهما رياضيا؟
- س: فسر اختلاف بين القوة الدافعة الكهربية للبطارية وفرق الجهد بين طرفيها ؟
- س: اذكر وحدات قياس التيار – المقاومة – المقاومة النوعية – القوة الدافعة الكهربية – التوصيلية الكهربية – كثافة التيار – المقاومة الداخلية لموصل ؟
- س: فرق بين التيار المستمر والتيار المتردد؟
- س: فرق بين الموصلات والعوازل من حيث التوصيلية الكهربائية – المقاومة النوعية – قابلية الحركة – كمية الالكترونات الحرة؟
- س: من اين تستمد الدائرة الكهربية طاقتها ؟ وفيما تستهلك هذه الطاقة؟

دوائر التيار المستمر

1.دائرة تحتوى على مقاومة اومية

كما بالشكل التالي اذا وصلت دائرة كهربية تحتوى على مقاومة اومية (R) بمصدر للجهد الكهربي (بطارية مثلا قوتها الدافعة الكهربية E) فان التيار الذى يمر فى هذه الدائرة يصل الى قيمتة المستقرة وهي $\frac{E}{R}$ لحظيا حيث ان المقاومة الاومية ليست من عناصر تخزين للطاقة الكهربية والشكل البياني المقابل يوضح ان للتيار قيمة ثابتة لا تعتمد على الزمن.



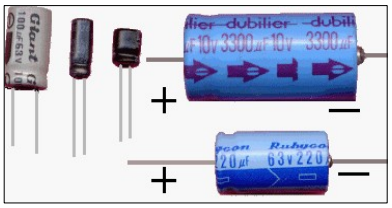
2.دائرة تحتوى على مقاومة اومية و مكثف

يتكون المكثف الكهربي من لوحين من مادة موصلة بينهما مادة عازلة، ويتحدد نوع المكثف على حسب المادة العازلة المستخدمة في صناعته، فإذا ما كانت المادة العازلة الموجودة بين لوحي المكثف هي الهواء فيطلق على المكثف في هذه الحالة اسم المكثف الهوائي، وإذا آانت مصنوعة من مادة البلاستيك سمي مكثف بلاستيك، وإذا آانت المادة العازلة من الميكا أطلق على المكثف اسم مكثف ميكا وإذا آانت المادة العازلة من السيراميك أطلق على المكثف اسم المكثف السيراميك، أما إذا استخدم محلول آيماوي آمادة عازلة بين لوحي المكثف أطلق على المكثف اسم المكثف الكيماوي أو الالكترولتي.

تعرف قدرة المكثف على تخزين الشحنة الكهربية بالسعة الكهربية أو السعة ووحدة قياسها الفاراد، وتحسب قيمة سعة المكثف كالآتي:

$$\text{سعة المكثف} = \frac{\text{الشحنة المخزونة في المكثف } Q \text{ بالكولوم}}{\text{فرق الجهد بين لوحين المكثف } V \text{ بالفولت}}$$

نستنتج من هذا القانون أن اختيار قيمة المكثف في الدائرة الإلكترونية تتحدد بعاملين أساسيين هما سعة المكثف، وقيمة فرق الجهد المطبق على طرفيه، ووحدة قياس السعة الفاراد يمكن تقسيمها إلى وحدات أصغر هي الميكرو فاراد والبيكوفاراد.



العوامل المؤثرة على سعة المكثف:

يوجد ثلاثة عوامل أساسية تؤثر على سعة المكثف بصورة مباشرة وهذه العوامل هي:

أ- المساحة السطحية لألواح المكثف (a):

إن سعة المكثف تتناسب طرديا مع المساحة السطحية للألواح، فإذا زادت مساحة سطح اللوح زادت سعة المكثف وذلك لزيادة استيعابه للشحنات الكهربائية، وبالعكس تقل سعة المكثف آلما قلت هذه المساحة.

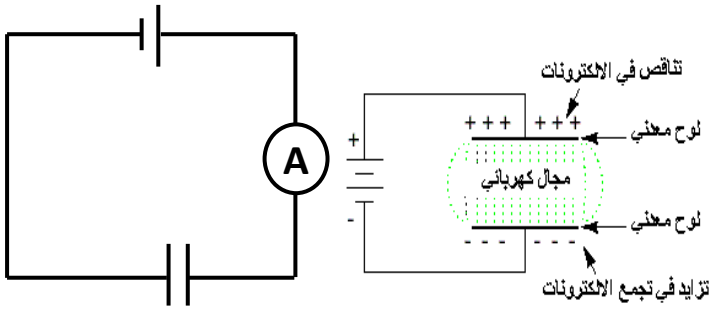
ب- المسافة بين الألواح (d):

تقل السعة عندما تزداد المسافة بين الألواح وتزداد كلما قلت تلك المسافة أي أنه يوجد تناسب عكسي بين سعة المكثف والمسافة بين ألواحه.

ج- الوسط العازل (المادة العازلة) ε:

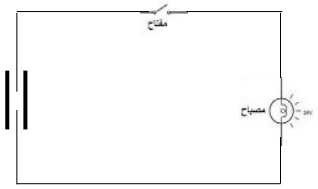
تتغير سعة المكثف بتغير المادة العازلة بين الألواح ويعتبر الهواء الوحدة الأساسية لمقارنة قابلية عزل المواد الأخرى المستعملة في صناعة المكثفات. يوجد لكل مادة ثابت عزل يطلق عليه ابسلو.ε

لكي نفهم فكرة عمل المكثف، سوف نقوم بتوصيل مكثف مع مصدر جهد مستمرDC كما في الدائرة التالية :



عندما يكون المفتاح في حالة open فإن الدائرة الكهربائية تكون مفتوحة ولايسري التيار في الدائرة، فلا تعمل الدائرة، ولكن عند غلق المفتاح، فإن فرق الجهد للبطارية سوف يعمل على مرور الإلكترونات وترسيبها على احد لوحين المكثف وهو اللوح القريب للقطب السالب (أي مرور تيار كهربائي)وعليه فان اللوح الآخر تتكون عليه شحنة موجبة بالتاثير وتلك العملية سوف تؤدي إلى تكون فرق جهد بين لوحي المكثف يعاكس جهد البطارية. تستمر عملية ترحيل الإلكترونات هذه ، وبالتالي فرق الجهد بين لوحي المكثف يزيد شيئا فشيئا حتى يصل فرق الجهد بين طرفي المكثف إلى نفس جهد البطارية، وبالتالي يتوقف مرور الإلكترونات (أي يصبح التيار صفرا) ولذا نقول بأن توصيل المكثف على التوالي يمنع مرور الإشارة للجهد المستمر DC ، ولكن هذا يحدث بعد زمن شحن المكثف، وسوف نتحدث عن هذا الزمن فيما بعد .

إذا المكثف يعمل على تخزين شحنة كهربائية Q بداخله وبالتالي ينشأ بين طرفيه فرق جهد معين ، فلو أخذنا المكثف السابق بعد شحنه، ووصلناه في الدائرة التالية مثلا:



فإنه عند التوصيل سنجد أن المصباح يضئ، أي أن المكثف أصبح كالبطارية المشحونة، ولكن سيظل المصباح يضئ لفترة ثم تبدأ شدة الإضاءة في النقصان، حتى يطفئ المصباح تماما ، وتفسير هذا أنه في بداية التوصيل كان المكثف كامل الشحن وبدأ المكثف يمد المصباح بالشحنات الكهربائية التي بداخلة كي

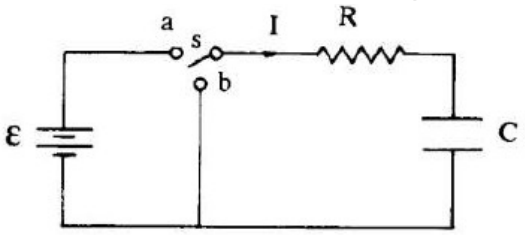
يضيء وبالتالي فإن الشحنات في حالة نقصان بإستمرار ، مما يعني أن فرق الجهد بين طرفيه أيضا في حالة نقصان مستمر ، حتى يفرغ المكثف كامل الشحنة التي بداخله ، فيتوقف المصباح عن العمل.

وفيما يلى ندرس دائرة تحتوى مكثف سعتة C ومقاومية مقدارها R متصلة على التوالى من خلال مفتاح S ببطارية قوتها الدافعة الكهربية ثابتة ومقدارها E كما بالشكل التالى :

☒ عند غلق الدائرة (اتصال المفتاح S بالنقطة a) وهى حالة يكون المكثف فى حالة شحن فبعد انقضاء زمن قدره t تكون قيمة شدة التيار المار فى المقاومة I مثلا وقيمة الشحنة على المكثف q وعندئذ تصبح قيمة الجهد بين طرفي المقاومة وطرفي المكثف كالتالي:

$$V_R = IR, V_C = \frac{q}{C}$$

ومعادلة توزيع الجهد للدائرة تكتب على الصورة التالية:



(1) $$E = V_R + V_C = IR + \frac{q}{c}$$

بضرب طرفى المعادلة فى Idt ينتج ان:

(2) $$EIdt = R\,I^2 dt + \frac{q}{c} Idt$$

بما ان $I = \frac{dq}{dt}$ تصبح المعادلة السابقة على الصورة:

(3) $$EIdt = R\,I^2 dt + \frac{q}{c} dq$$

بالنظر الى هذه المعادلة حيث يمثل المقدار $EIdt$ الطاقة المستمدة من البطارية بعد زمن قدرة dt ويمثل المقدار $R\,I^2 dt$ الطاقة المبددة على شكل طاقة حرارية فى الدائرة اما المقدار $\frac{q}{c} dq$ فيمثل الطاقة المستخدمة فى تخزين الشحنات على المكثف.

ويستمر شحن المكثف حتى ياخذ شحنتة العظمي، q_0 بعد انقضاء زمن معين تعتمد قيمتة على قيمتي السعة C والمقاومة R عندها يقف التيار تماما وتؤول قيمتة الى الصفر وعليه تؤول المعادلة (1) الى الصورة التالية:

(4) $$E = \frac{q_0}{c}$$

ولمعرفة قيمة الشحنة على المكثف عند اى لحظة t خلال فترة شحن المكثف يتبع ما يلى:.

(5) $$E = R\frac{dq}{dt} + \frac{q}{c}$$

وبضرف اطراف المعادلة فى C وإعادة كتابتها على الصورة:

(6) $$Rc\frac{dq}{dt}=Ec-q$$

بوضع $y=Ec-q$ وعليه يكون $\frac{dy}{dt}=\frac{-dq}{dt}$ وبالتعويض فى المعادلة (5) يكون:

(7) $$-Rc\frac{dy}{dt}=y$$

بفصل المتغيرات واجراء التكامل كالتالى:

(8) $$\frac{dy}{y}=\frac{-1}{Rc}dt$$

$$\therefore lny=\frac{-1}{Rc}t+const.$$

وبالتعويض عن قيمة y تصبح المعادلة السابقة كالتالي:

(9) $$\therefore \ln(Ec-q)=\frac{-1}{Rc}t+const.$$

يمكن تعيين قيمة ثابت التكامل باستخدام الشروط الابتدائية وهى عند بداية الشحن اى t=0تكون قيم الشحنة تساوى الصفر اى q=0 وبالتالي الثابت يساوى lnEc وعليه المعادلة (7) تصبح على الصورة:

(10) $$\therefore \ln(Ec-q)=\frac{-1}{Rc}t+\ln Ec$$

ويمكننا كتابة المعادلة (8) على الصورة التالية :

(11) $$q=Ec\left(1-e^{\frac{-t}{Rc}}\right)$$

وعندما يتم الشحن سوف يمتنع سريان التيار وتصبح النهاية العظمي للشحنة q0 وبالتعويض عن Ec من المعادلة (4) تصبح المعادلة (11) على الصورة التالية:

(12) $$q=q_0\left(1-e^{\frac{-t}{Rc}}\right)$$

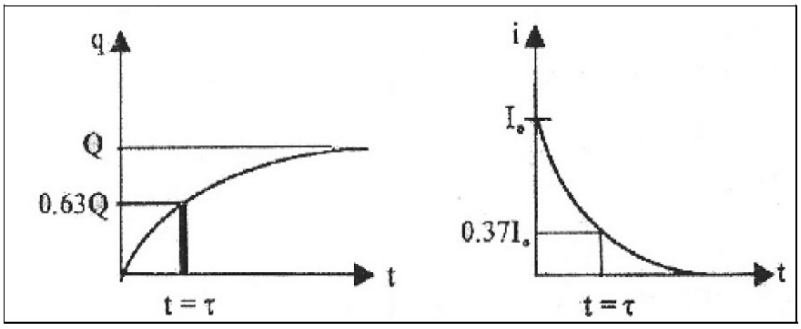
وبتفاضل المعادلة (12) يمكننا كتابتها بدلالة التيار اى :

(13) $$I=\frac{E}{R}e^{\frac{-t}{Rc}}=I_0e^{\frac{-t}{Rc}}$$

حيث I_0 هى القيمة العظمي للتيار التى يتم الحصول عليها عند لحظة غلق الدائرة.

والمقدار RC يسمي ثابت الزمن لان له وحدات الزمن (اثبت ذلك) .

وبالنظر الى المعادلتيين (12) و(13) نلاحظ ان الشحنة والتيار يسلكان طريقين متعاكسين حيث تتزايد الشحنة من الصفر الى قيمة عظمي بينما التيار يتناقص التيار من قيمة عظمي الى الصفر. والشكل البياني التالى يوضح ذلك.



بوضع t=Rc فى المعادلة (12) يكون:

$$q=q_0\left(1-e^{-1}\right)=q_0(1-0.37)=0.63\,q_0$$

اى ان الثـابت الـزمن هـو الـزمن اللازم لنمـو الشـحنة على المكثـف من الصـفر الى 0.63 من قيمتهـا العظمي.

اما بوضع t=Rc فى المعادلة (13) يكون:

$$I=I_0e^{-1}=0.37\,I_0$$

وهذة الصورة تعطي تعريف آخر لثابت الزمن بانه الـزمن اللازم لكي يصـل تيـار الشـحن الى 0.37 من قيمتة العظمي.

☒ امـا فى حالـة تفريـغ المكثـف اى بتوصـيل المفتـاح S بـالطرف b فـان المكثـف الـذى سـعته c وشـحنتة الابتدائية q_0 سوف يبدأ فى تفريغ شحنته خلال المقاومـة R وبفـرض انـه بعـد مـرور زمن t من بـدء التفريغ أصبحت الشحنة على المكثف q وتيـار التفريـغ I وحيث ان الـدائرة لا تحتـوى على بطاريـة فان المعادلة (1) تكتب على الصورة التالية:

$$0=IR+\frac{q}{c} \qquad (14)$$

$$\therefore R\frac{dq}{dt}=\frac{-q}{c}$$

بفصل المتغيرات والتكامل ومراعاة حدود التكامـل وهى عن t=o تكـون $q=q_o$ وعنـد زمن t تكـون الشحنة تساوى q.

$$\int_{q_0}^{q}\frac{dq}{q}=\int_{0}^{t}\frac{-1}{Rc}\,dt$$

$$\therefore lnq-\ln q_0=\frac{-1}{Rc}t$$

$$\therefore q=q_0e^{\frac{-t}{Rc}} \qquad (15)$$

ولكتابـة المعادلـة (15) بدلالـة التيـار نفاضـل المعادلـة بالنسـبة للـزمن والاسـتعانة بالمعادلـة (4) تصـبح المعادلة على الصورة التالية:

$$\therefore I=-I_0e^{\frac{-t}{Rc}} \qquad (16)$$

والاشارة السالبة والتى لاتظهر فى المعادلة (13) تدل على ان تيار التفريغ ضد تيار الشحن.

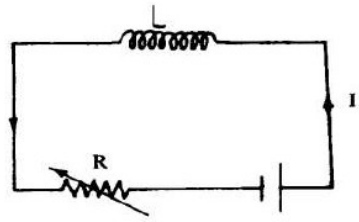
تمرين: اشتق تعريـف لثـابت الـزمن فى حالـة التفريـغ بالنسـبة للشـحنة او للتيـار وقـارن بينـه وبين حالـة الشحن؟ ووضح اجابتك بمخطط بياني؟

وتطبيق عملي لهذه الدائرة يمكننا استخدامها فى المعمل والاستعانة بالمعادلات التى تم اشتقاقتها حساب المقامات عالية القيمة وذلك عند تفريغ وشحن المكثف خلال المقاومةز ومن امثلة هذه التجارب تسرب شحنة بالميكرو وايضا تسرب شحنة بالجلفانومتر.

4- دائرة تحتوي علي ملف حثي

يمر تيار شدته I في ملف عدد لفاته N لفة. فإذا كان التيار ثابتا ثم تغيرت شدته بواسطة مقاومة متغيرة، شكل (٨-٦)، فإن هذا التغير في التيار يؤدي إلى تغير الفيض المغناطيسي Φ داخل هذا الملف نفسه وبهذا تتولد في الملف ذاته قوة دافعة تأثيرية عكسية ذاتية ε تقاوم التغير المسبب لها طبقا لقاعدة لنز، فإذا زاد التيار الأصلي I فإن ε الذاتية تتولد في اتجاه مضاد له وإذا نقص التيار الأصلى فإن ε الذاتية تتولد في اتجاهه نفسه.

ويتوقف عدد خطوط الحث المتصلة بالدائرة والناتجة عن التيار المار بهذه الدائرة على الخواص الهندسية للدائرة، أي على شكلها ومساحتها وعدد لفاتها... الخ، ولكن بصرف النظر عن هندسة الدائرة فإن كثافة التدفق عند أي نقطة تتناسب طرديا مع التيار الذي ينتجه، ولذا فإن التدفق أيضا يتناسب مع التيار.



شكل (٨-٦): مرور تيار في ملف عدد لفاته N، أما R فهي عبارة عن مقاومة متغيرة «ريوستات» وضعت لتغير قيمة التيار.

$$\Phi \propto I$$

$$\therefore \Phi = KI$$

حيث K ثابت يتوقف على العوامل الهندسية للدائرة إذا كانت N عدد لفات الملف فإن القوة الدافعة التأثيرية تعطى بالعلاقة التالية المعروفة بقانون فاراداي :

$$\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dI} \cdot \frac{dI}{dt} = -NK\frac{dI}{dt}$$

فإذا رمز لحاصل الضرب NK برمز واحد وليكن L فإن

$$\varepsilon = -L\frac{dI}{dt}$$

ويسمى الثابت L معامل الحث الذاتي (coefficient of self inductance) أو باختصار الحث الذاتي (self inductance).

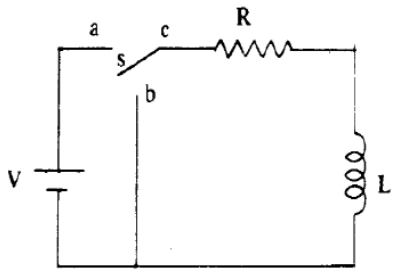
ويعرف الحث الذاتي أنه *«القوة الدافعة التأثيرية الذاتية المتولدة في ملف عندما تتغير شدة التيار في الملف نفسه بمعدل وحدة شدة التيار في الثانية»*

يتضح أن الوحدات في النظام العالمي (S.I.) للحث الذاتي هي (L = V/(A/s)

أو ما يسمى بالهنري (Henry)

3. <u>دائرة تحتوى على مقاومة اومية وملف</u>

عند توصيل مصدر جهد ثابت مقداره V الى دائرة كهربية تحتوى على مقاومة اومية R وملف حثة الذاتي L كما بالشكل التالي:



☒ فى حالة نمو التيار

فعند قفل الدائرة فان المجال المغناطيسي الذى ينشأ فى الملف ينمو مع التيار وتتولد قوة دافة كهربية مضادة تتوقف قيمتها على معامل الحث الذاتي للملف L ومعدل نمو التيار $\frac{dI}{dt}$ حيث I شدة التيار المار فى الدائرة عند اللحظة t اعتبارا من بداية قفل الدائرة. وطبقا لهذه الحالة فان للجهد مركبتين إحداهما

للتغلب علي هبوط الجهد فى المقاومة IR والاخرى لموازنة القوة الدافعة الكهربيـة المضـادة $L\frac{dI}{dt}$ ومن ثم فان معادلة توزيع الجهد تكون على الصورة:

$$V = IR + L\frac{dI}{dt} \qquad (17)$$

وبضرب المعادلة فى Idt يمكن الحصول علي:

$$VIdt = I^2Rdt + LIdt\frac{dI}{dt} \qquad (18)$$

والمعني الفيزيائي لهذة المعادلة يكون بتفسير او توضيح معني كل مقدار فيها وهو كالتالي:

المقدار $VIdt$ هو يمثل كمية الطاقة الكهربية التى تاخذها الدائرة من المصدر فى الزمن dt.

اما المقدار I^2Rdt فيمثل الطاقة التتى تتبدد فى الدائرة على شكل طاقة حرارية فى المقاومة R.

والمقدار $LIdt\frac{dI}{dt}$فهو يمثل الطاقة التى تستخدم فى بناء المجال المغناطيسي فى الزمن dt وتختزن فيه. وتظل الامور تسير على هذا النحو من بداية قفل الدائرة حتى يبلغ التيار قيمتة النهائية فيقف نموه عند قيمة ثابتة I_0 وتصبح قيمة $\frac{dI}{dt}$ مساوية للصفر عندئذ يقف نمو المجال المغناطيسي وتصبح الطاقة التى يعطيها المصدر الكهربي للدائرة كلها مساوية للطاقة الحرارية التى تتبدد فى المقاومة وبالتالي تخضع الدائرة لقانون اوم اى ان:

$$V = I_0 R$$

$$V\, I_0 dt = I_0^2 Rdt$$

ويمكن الحصول على قيمة التيار I عند اى لحظة t خلال فترة نموه بعد قفل الدائرة اى اتصال s بـ a كما بالشكل السابق من خلال حل المعادلة التفاضلية (17) ويتم ذلك على النحو التالي:

يمكننا كتابة المعادلة (17) بعد قسمة جميع حدودها على R وإعادة ترتيبها على الصورة:

$$\frac{L}{R}\frac{dI}{dt} + \left(I - \frac{V}{R}\right) = 0 \qquad (19)$$

وبوضع المقدار $y = \left(I - \frac{V}{R}\right)$ ومنها $\frac{dI}{dt} = \frac{dy}{dt}$ والتعويض فى المعادلة (19) يكون:

$$\frac{L}{R}\frac{dy}{dt} + y = 0$$

$$\therefore \frac{dy}{y} = \frac{-R}{L}dt$$

وبتكامل هذه المعادلة نحصل على :

$$\ln y = \frac{-R}{L}t + const.$$

$$\ln\left(I - \frac{V}{R}\right) = \frac{-R}{L}t + const.$$

وبتطبيق الشروط الابتدائية اى عند $t=0$ فان $I=0$ نحصل على قيمة ثابت التكامل والذى يساوى $\ln\left(\frac{-V}{R}\right)$ وبالتعويض فى المعادلة السابقة عن قيمة الثابت هذه يكون:

$$\ln\left(I - \frac{V}{R}\right) = \frac{-R}{L}t + \ln\left(\frac{-V}{R}\right) \qquad (20)$$

وبترتيب المعادلة على النحو التالي:

$$\ln\left(\frac{I - \frac{V}{R}}{\frac{-V}{R}}\right) = \frac{-R}{L}t$$

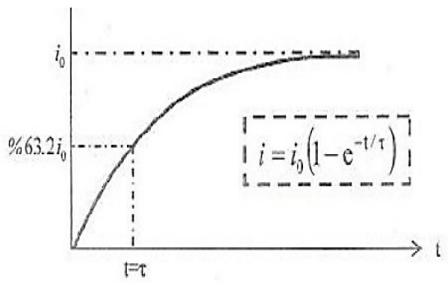
وبأخذ اللوغاريتم e للطرفين وترتيب المعادلة ينتج ان :

$$I - \frac{V}{R} = \frac{-V}{R}e^{\frac{-R}{L}t}$$

$$\therefore I = I_0\left(1 - e^{\frac{-R}{L}t}\right) \qquad (21)$$

حيث I_0 هى القيمة النهائية الثابتة للتيار الذى يمر فى الدائرة.

الشكل البياني يوضح تغيير التيار I بالنسبة للزمن t حسب العلاقة (21).



☒ فى حالة اضمحلال التيار

فى هذه الحالة نوصل المفتاح s بالنقطة b اى ان القوى الدافعة V للبطارية تساوي صفرا لان البطارية اصبحت مستبعدة وبذلك تكتب المعادلة (17) الي:

$$0 = IR + L\frac{dI}{dt} \qquad (22)$$

وبترتيب المعادلة وفصل المتغيرات وإجراء التكامل كالتالي:

$$\frac{dI}{I} = \frac{-R}{L}dt$$

$$\therefore \ln I = \frac{-R}{L}t + const.$$

وبتطبيق الشروط الابتدائية اى عند $t=0$ فان $I = I_0$ وذلك عند لحظة انقطاع التيار نحصل على قيمة ثابت التكامل والذى يساوى $\ln I_0$ وبالتعويض فى المعادلة السابقة عن قيمة الثابت هذه وترتيب المعادلة وبالتالي نحصل علىالمعادلة التى تعبر عن اضمحلال التيار والتى تكون على الصورة:

$$\therefore I = I_0 e^{\frac{-R}{L}t} \qquad (23)$$

تمرين: ارسم شكلا بيانيا يعبر عن هذه المعادلة.

والمقدار $\frac{L}{R}$ يسمي إيضا ثابت الزمن لان له وحدات الزمن (اثبت ذلك) .

بوضع $t = \frac{L}{R}$ فى المعادلة (21) نحصل على التالي:

$$\therefore I = I_0\left(1 - e^{-1}\right) = 0.63\, I_0$$

وفى هذه الحالة يمكننا تعرف الثابت الزمني بانه الزمن الذى يستغرقة التيار لكي يصل الى 0.63 من قيمتة النهائية الثابتة.

بوضع $t = \frac{L}{R}$ فى المعادلة (23) نحصل على التالي:

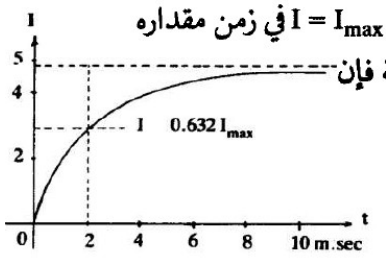
$$\therefore I = I_0 e^{-1} = 0.37\, I_0$$

وفى هذه الحالة يمكننا تعرف الثابت الزمني بانه الزمن اللازم لوصول التيار الى 0.37 من قيمتة الاصلية.

وبضرب المعادلة (22) فى Idt نحصل على معادلة الطاقة بالصورة التالية:

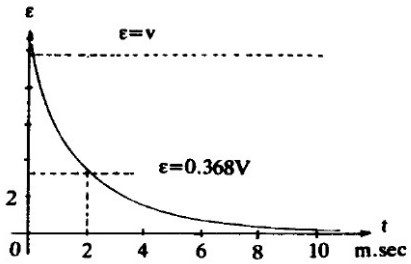
$$0 = I^2 Rdt + LIdt\frac{dI}{dt}$$

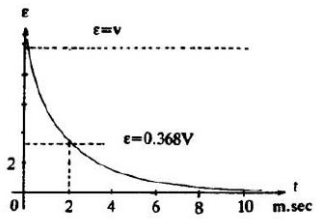
ويتضح من هذه المعادلة ان الطاقة التى تتبدد المقاومة على شكل طاقة حرارية مستمدة من الطاقة من الطاقة المختزنة فى المجال المغناطيسي، ولذلك فان الطاقة المختزنة فى المجال المغناطيسي تكون قد استنفذت عن آخرها وتصبح قيمتها صفرا عندما تصبح قيمة التيار صفرا.

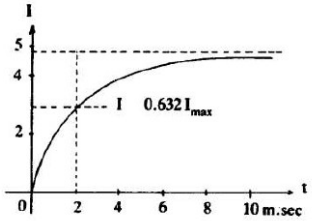


$$\varepsilon = Ve^{-\frac{R}{L}t}$$

حيث ε القوة الدافعة المستحدثة







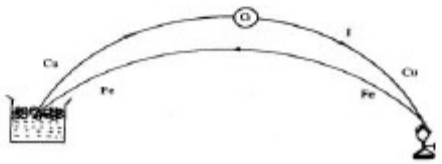
التأثيرات الكهروحراريه Thermoelectric effect

هو تحويل مباشر لاختلافات درجات الحرارة إلى جهد كهربائي والعكس.

إن تحويل الحرارة مباشرة إلى طاقة كهربائية تحويلاً عكسياً يتم بثلاث ظواهر هي: **أثر سيبك وأثر بِلْتِيه وأثر طومسون.**

أثر سيبك

يتعلق بتولد قوة دافعة كهربائية (ق.د.ك) في دائرة كهربائية مكونة من ناقلين مختلفين جُعلت وُصلتاهما في درجتيْ حرارة مختلفتين.



حيث وجد أنه عند توصيل معدنين مختلفين على التوالي بجلفانومتر حساس كما في شكل (٢٧-٤) فإن تيارا يمر في الجلفانومتر بدون وجود قوة دافعة كهربية خارجية في الدائرة ويحتاج الأمر فقط لرفع درجة حرارة أحد موضعي الاتصال عن درجة حرارة موضع الاتصال الآخر. ويسمى هذا التيار الناتج عن اختلاف درجة الحرارة بالتيار الكهربي الحراري (thermoelectric current) والقوة الدافعة التي نشأ عنها هذا التيار بالقوة الكهربية الحرارية (thermoelectric force) وتتوقف القوة الدافعة الكهربية الحرارية على:

ا ـ نوعي المعدنين.

ب ـ درجة حرارة طرفي اتصال المعدنين.

وتستخدم ظاهرة سيبك لقياس درجة الحرارة، حيث يترك أحد موضعي الاتصال معرضا للجو أو يوضع في جليد نقي آخذ في الانصهار (درجة الصفر المئوي) أو في سائل النيتروجين بحيث تظل درجة حرارته ثابتة وتسمى بدرجة حرارة الاسناد (reference temperature) في حين يعرض موضع الاتصال الآخر للشيء المراد قياس درجة حرارته وبقياس التيار الناتج يمكن الاستدلال على درجة الحرارة المجهولة.

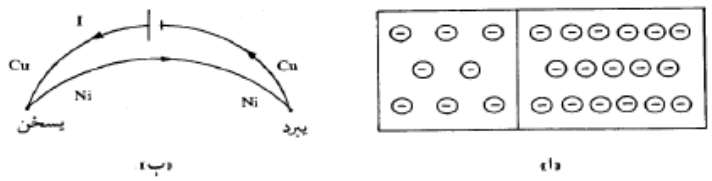
ظاهرة «تأثير» بلتير The Peltier effect

عند إمرار تيار كهربائي مستمر في وُصْلة مكونة من سلكين معدنيين مختلفين تنخفض درجة حرارة الوصلة أو ترتفع تبعاً لاتجاه التيار فيها.

وقد استُعملت في دراسة الظاهرة أزواج مختلفة من المعادن (حديد - نحاس) و(بزموت - نحاس)، ودلت التجارب على أن قوةً كهربائية تتولد عن الوصلة وجهتها من البزموت إلى النحاس وسُميت هذه القوة قوة بلتيه.

يعرّف معامل بلتيه بأنه كمية الطاقة الحرارية المتولدة أو الممتصة في وصلة المادتين من جراء مرور شحنة كهربائية في الوصلة مقدارها كولوم واحد.

وقد استُفيد من الظاهرة في التبريد الكهرحراري الذي طُبِّق منذ عام 1960 باستعمال أنصاف النواقل semiconductorsالتي اكتشف فيها هذا الأثر، وبخاصة في المادة بزموت - تيلوريد- bismuth telluride التي تتميز بناقلية حرارية ضعيفة مقارنة بالمعادن، وبقيمة معامل بلتيه الكبيرة التي تبلغ 120 ملّي فولت، في حين أنها 3 ملي فولت في وصلة « حديد - نحاس» ، و21 ملي فولت في وصلة « بزموت - نحاس» . **وسبب هذه القوة الدافعة الكهربية هو انتشار (diffusion) الإلكترونات الحرة من أحد الموصلين إلى الموصل الآخر طالما كان ضغط الغاز الإلكتروني (electron gas) أكثر تركيزا في أحد الموصلين عن الآخر كما في شكل (١٢٩ - ٤).**



وإذا عُدت مقاومة الموصلين مهملة فإن الطاقة الحرارية الممتصة (heat absorbed) والمتحررة (heat liberated) عند أي من الموضعين نتيجة لمرور التيار I في زمن قدره t هي:

$$H' = \pi It$$

حيث π هو معامل بلتير (Peltier coefficient) أو ما يسمى بقوة دافعة بلتير ووحدتها الفولت.

أمـا إذا كان للموصلين مقاومة قدرها R فإنه نتيجة لمرور التيار خلال المقاومة ستتولد طاقة حرارية تتسبب في ارتفاع درجة الحرارة عند كل من موضعي الاتصال. ولكن نتيجـة لوجـود القـوة الـدافعـة البلتيرية يحدث انخفاض في درجة حرارة أحد الموضعين وارتفاع في درجة حرارة الموضع الآخر وفي هذه الحالة تعطى كمية الحرارة في زمن قدره t بالمعادلة :

$$JH = I^2 Rt \pm \pi It$$

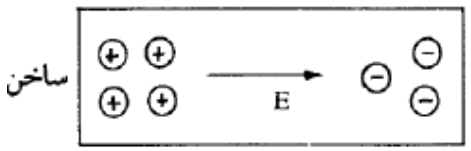
حيث J ثابت جول (المكافىء الميكانيك لجول)

ويلاحظ أن ظاهرة بلتير ظاهرة انعكاسية أي إذا عكس اتجاه التيار يصبح موضع الاتصال البارد ساخن والعكس بالعكس مقارنة بالوضع الأول السابق ذكره. كما أن قيمة القوة الدافعة البلتيرية لا تزيد عن عدة ملّي فولت mV . واكتشفت ظاهرة بلتير عام ١٨٣٤م.

ظاهرة «تأثير» طومسون Thomson effect

أثبت العـالم وليام طومسـون (S. W. Thomson) بالتجربة أنه إذا كانت هناك نقطتان على قضيب معدني تختلف درجتا حرارتهما، بحيث يكون الفرق بينهما dT ، تنشأ قوة دافعة كهربية بينهما تتناسب مع الفرق في درجة الحرارة dT.

إذا سخن أحد طرفي قضيب معدني ويرد الطرف الآخر كما في شكل (٣٠-٤) بحيث يتـوفـر في القضيب تدرج حراري معين فإنه ينشأ في القضيب مجال كهربي E نتيجـة لتراكم الإلكـترونات الحرة في أحد طرفي القضيب وهـو الـطرف البارد وقلت كثـافتهـا عند الطرف الساخن. وفي هذه الحـالـة يصبـح جهـد الطرف البارد سالبا وجهد الطرف الساخن موجبا.



شكل (٣٠-٤): التـدرج الحـراري لموصـل سخن أحـد طرفيه بينـما الطرف الآخر بارد.

وقد وجد أن هذا المجال يتناسب طرديا مع التدرج الحراري (temperature gradient) «معدل تغير درجة الحرارة dT بالنسبة للمسافة dx على طول القضيب المعدني» أي أن :

$$E \propto \frac{dT}{dx} \quad \therefore E = \sigma \frac{dT}{dx}$$

$$E = \frac{d\varepsilon}{dx}$$

$$\therefore d\varepsilon = \sigma\, dT$$

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} \sigma\, dT$$

حيث T_1 و T_2 درجتا الحرارة عند طرفي الموصل، وتسمى σ بمعامل طومسون (Thomson coefficient) ، بينما تسمى القوة الدافعة الكهربية الحرارية بالقوة الدافعة الطومسونية (Thomson E.M.F.) ومن الملاحظ أن القوة الدافعة الكهربية الحرارية لطومسون لا تبلغ قيما كبيرة بل إن قيمتها لا تزيد على بعض كسور الألف من الفولت.

الفصل الرابع
المغناطيسية الكهربية

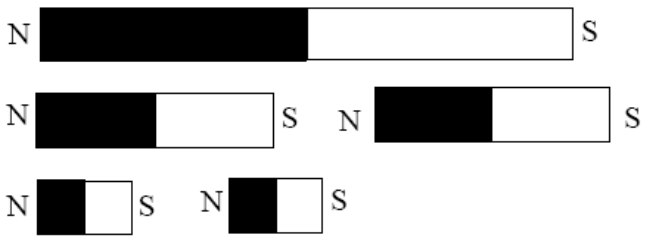
المغناطيسية الكهربائية

مقدمة:

الكهرومغناطيسية (المغناطيسية الكهربائية) وهي العلاقة بين المغناطيس والكهرباء أو بتعبير آخر الكهرومغناطيسية هي فيزياء الحقل (المجال) الكهرومغناطيسي أي إنها فرع الفيزياء الذي يدرس الحقل الكهرومغناطيسي الذي يتألف بدوره من حقل كهربائي و حقل مغناطيسي. ينشأ الحقل الكهربائي عن الشحن الكهربائية الساكنة التي تسبب القوى الكهربائية المسؤولة عن الكهرباء الساكنة و المحددة بقانون كولوم. تقود هذه الحقول الكهربائية أيضاً إلى جريان التيار الكهربائي في الموصلات الكهربائية. أما الحقل المغناطيسي فهو ينتج عن المغانط المختلفة إضافة للشحن الكهربائية المتحركة ، فعندما تسير شحنة الكهربائية ضمن تيار كهربائي ينشأ عنها حقل مغناطيسي محيط بها . لذلك يصعب فصل هذين الحقلين عن بعضهما البعض في الكثير من الحالات .

المغناطيس الطبيعي:

إذا كسرنا قضيبا مغناطيسيا نتج لدينا مغناطيسان لكل منهما قطب شمالي و قطب جنوبي، و يمكن عن طريق التكسير المتتالي تقسيم المغناطيس إلى أي عدد كبير من المغناطيسيات الشكل (٩- ١). و يمكن أن نتصور استمرار هذه العملية حتى أصغر جسيم، و هو الذرة، لنصل إلى افتراض أن الذرة أيضاً مغناطيس له قطب شمالي و قطب جنوبي. و على ذلك فإن المغناطيس يتكون من عدد كبير من المغناطيسيات المفردة الصغيرة، و هي ما تسمى بالمغناطيسات الذرية أو المغناطيسات الجزيئية.

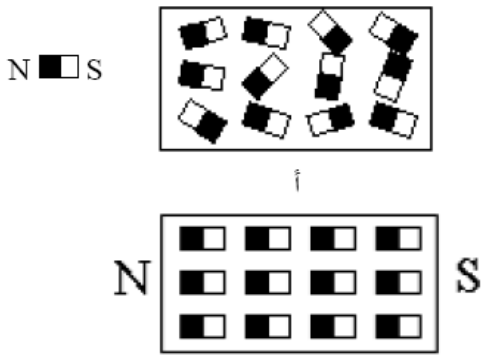


الشكل (٩-١) تقسيم المغناطيسات

تتألف جميع المواد من ذرات بها نواة موجبة الشحنة تدور حولها إلكترونات سالبة الشحنة فحركة هذه الشحنات السالبة تكون تيارات الكهربائية صغيرة مما يتسبب في إحداث مجال مغناطيسي ذري له عزم مغناطيسي ذري.

وفي حالة عدم وجود أي مجال مغناطيسي خارجي تكون التيارات الصغيرة في اتجاهات مختلفة عشوائية كما في الشكل (٩- ٢أ) مما يسبب في إحداث مجالات مغناطيسية ذرية محددة في حجم الذرة و محصلة التيارات و العزوم المغناطيسية في المادة تلغي بعضها بعضاً و بذلك لا يظهر أي أثر للمجال المغناطيسي. و يشذ عن هذه الحالة المغناطيس الدائم.

أما إذاً وضعت المادة في مجال مغناطيسي خارجي، حثه B ، فإن القوة المغناطيسية المؤثرة على الشحنات المتحركة تغير من اتجاه مدار الإلكترونات في الذرات و مسار التيار للإلكترونات الحرة في المعادن و لذلك يتولد مجال مغناطيسي يكون اتجاهه مع اتجاه المجال الخارجي كما في حال المواد البارامغناطيسية كما في الشكل (٩- ٢ب) أو عكس اتجاه المجال الخارجي كما في حالة المواد الدايامغناطيسية.



أ

ب

الشكل (٩- ٢)

أ- العزوم المغناطيسية في اتجاهات مختلفة عشوائية و ذلك قبل وضعها فى المجال المغناطيسي الخارجي.

ب- العزوم بعد وضعها في المجال الخارجي.

المغناطيس الكهربائي:

المغناطيس الكهربائي عبارة عن مغناطيس تتولد فيه المغناطيسية فقط بسبب تدفق تيار كهربي خلال سلك ما. وعادة ما تُصنع المغناطيسات الكهربائية من ملف من السلك بعدد لفات كبيرة لزيادة التأثير المغناطيسي. ويُمكن زيادة المجال المغناطيسي الذي ينتجه الملف بوضع مادة مغناطيسية، كقضيب حديدي، داخل الملف. ويتسبب التيار المار خلال الملف في تحول الحديد إلى مغناطيس مؤقت.

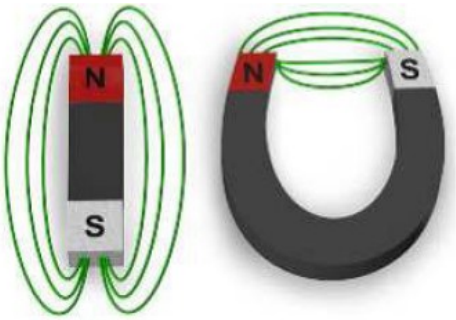
توليد مجال كهرومغناطيسي:

عندما يمر تيار كهربي خلال جزء من السلك فإنه يتولد مجال مغناطيسي حوله. وعند لف السلك حول قطعة من المعدن، مع ترك القطبين الشمالي والجنوبي مكشوفين يتمغنط المعدن، بحيث يصبح مغناطيسًا كهربائيًا. وعادة ما يستخدم تجار الحديد الخردة مغناطيسات كهربية ضخمة لالتقاط السيارات القديمة، وعند فصل التيار الكهربي عن المغناطيس فإنه ينقد قوته ويمكن إسقاط السيارة في مكان آخر.

المجال المغناطيسي:

المجال (الحقل) المغناطيسي هي قوة مغناطيسية تنشأ في الحيز المحيط بالجسم المغناطيسي أو الموصل الذي يمر به تيار كهربائي؛ أو بتعبير أبسط يمكن وصفها بأنها المنطقة المحيطة بالمغناطيس ويظهر فيها أثره (على مواد معينة). فإذا وضعت إبرة بوصلة في المجال المغناطيسي ذو قوة ما فإنها توجه نفسها في اتجاه معين في كل جزء من المجال، والخطوط المرسومة في اتجاه الإبرة عند النقط المختلفة تحدد الوضع العام للخطوط التي هي عليها القوة المغناطيسية في المجال.

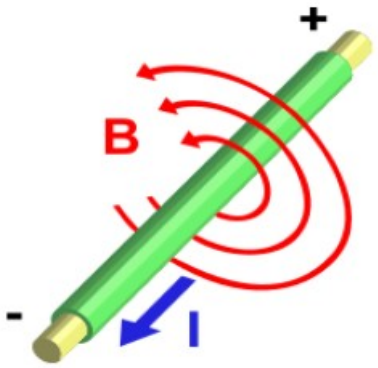
ويمكن تمثيل المجال المغناطيسي بخطوط القوى المغناطيسية الشكل (٩- ٣) بحيث تكون كثافة الخطوط لكل وحدة مساحات من عنصر مساحة عمودية على اتجاه خطوط القوى و هي مقدار المجال المغناطيسي. ويكون اتجاه المماس لخط القوى عند أية نقطة عليه معطياً اتجاه المجال المغناطيسي B عند تلك النقطة.



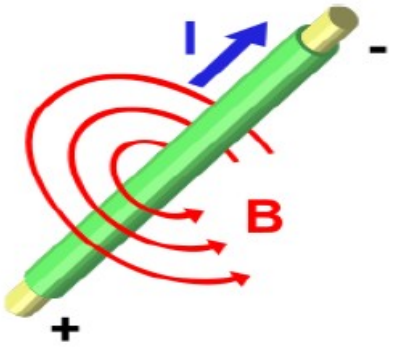
الشكل (٩- ٣)

المجال المغناطيسي الناتج عن موصل مستقيم يحمل تياراً مستمراً (قاعدة اليد اليمنى):

عند وضع قطعة مغناطيس صغيرة بالقرب من سلك يحمل تيارا نرى أن المغناطيس يصبح تحت تأثير قوة شبيهة بالقوة التي تظهر بين قطبين مغناطيسيين. و بهذا فإن السلك الحامل للتيار يسلك سلوك قطب مغناطيسي و يؤثر في قطعة المغناطيس المجاورة له. فنقول عن قطعة المغناطيس بأنها واقعة في المجال المغناطيسي الناشئ عن مرور التيار في السلك و نمثل المجال المغناطيسي الذي يولده التيار بخطوط دائرية مركزها السلك و يكون الاتجاه المحدد على الخطوط هو اتجاه القوة المؤثرة في قطب شمالي مجاور للسلك و كما هو موضح في الشكل (٩- ٤أ) و ينعكس اتجاه خطوط المجال عند عكس اتجاه التيارالشكل (٩- ٤ب).

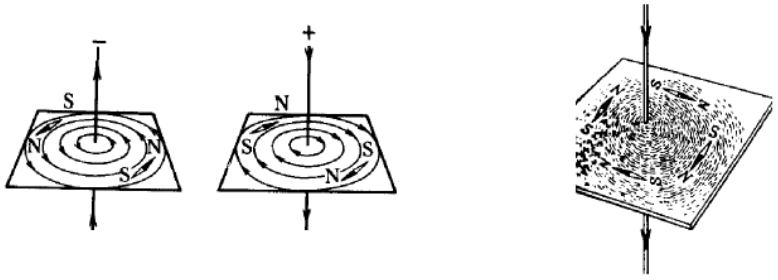


(ب)



(أ)

ويمكن مشاهدة توزيع المجال المغناطيسي بنثر برادة حديد على ورقة موضوعة على قضيب مغناطيسي الشكل (٩- ٥أ) أو ورقة يمر خلالها سلك يمر به تيار كهربائي الشكل (٩- ٥ب).



(ب) (أ)

الشكل (٩- ٥)

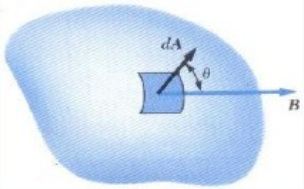
تتمثل القوة أو شدة المجال المغناطيسي بكثافة الخطوط التي تقطع مساحة متر مربع متعامدة معها. فكلما اقتربنا من السلك ازدادت القوة أو شدة المجال و بذلك ازدادت كثافة الخطوط و أصبحت الدوائر متقاربة. في حين أن المسافة تزداد بين الدوائر و تقل كثافة الخطوط عند الابتعاد عن السلك.

الفيض (التدفق) المغناطيسي:

الفيض المغناطيسي وكما عرف بالفيض الكهربائي سابقاً يمكن تعريفه الفيض المغناطيسي على أنه عدد الخطوط المغناطيسية التي تعبر وحدة المساحات العمودية. افترض أن dA عبارة عن عنصر مساحة من سطح غير منتظم كما في الشكل(٩- ٦)، فالفيض المغناطيسي يعبر عنه بشدة المجال المغناطيسي B مضروب في المساحة العمودية dA. ويرمز للفيض المغناطيسي بالرمز Φ_m.

$$\Phi_m = \int B.dA \qquad (9\text{-}1)$$

$$\Phi_m = BA\cos\theta$$



الشكل (٩-٦)

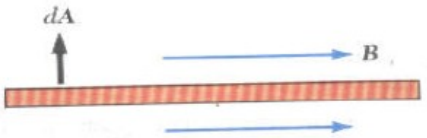
إذ يمثل A المساحة التي يقطعها الفيض Φ . و تقاس Φ بوحدة الويبر(Weber)Wb . أما B فإنها تقاس بالتسلا ويرمز لها بالرمز T

$$\frac{Newton}{Coulomb.\frac{meter}{Second}} = \frac{Newton}{Ampere.meter} = Tesla \equiv Weber/m^2$$

ووحدة Tesla هي وحدة كبيرة ويمكن استخدام وحدة الجاوس في نظام جاوس للوحدات حيث إن

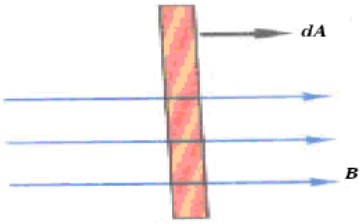
$$Tesla = 10^4\ Gauss$$

حيث إن dA هو متجه المساحة وقيمته تعطي مقدار المساحة واتجاهه يكون دائماً عمودياً على المساحة.



الشكل (٩- ٧)

في الشكل (٩- ٧) الفيض المغناطيسي يساوي صفراً لأن المتجه dA عمودي على متجه المجالB .



الشكل (٩-٨)

في حالة الشكل (٩- ٨) الفيض المغناطيسي يساوي BA لأن المتجه dA في نفس اتجاه على متجه المجال B والزاوية المحصورة تساوي صفراً.

شدة المجال الناتج عن موصل مستقيم يحمل تياراً مستمراً :

ترتبط خطوط القوى المغناطيسية باتجاه التيار الذي ولدها حسب قاعدة اليد اليمنى الموضحة في الشكل (٩- ١٤) نص هذه القاعدة على أنه عند القبض على السلك الحامل للتيار باليد اليمنى، بحيث يشير الإبهام إلى اتجاه التيار ، فإن أطراف باقي الأصابع تشير إلى اتجاه المجال.

ويعطى الحث المغناطيسي الناتج عن التيار I المار في سلك مستقيم طويل بالمعادلة

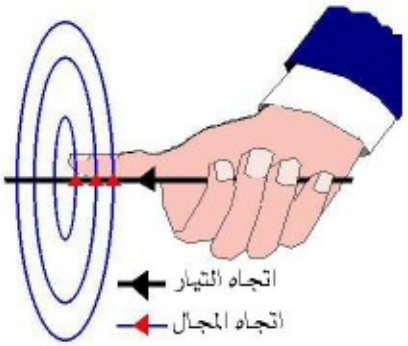
$$B=\frac{\mu I}{2\pi a} \qquad (9\text{-}7)$$

حيث a هي المسافة بين النقطة التي نحسب عندها الحث والمسقط العمودي لهذه النقطة على محور السلك، كما هو موضح في الشكل (٩- ١٥).

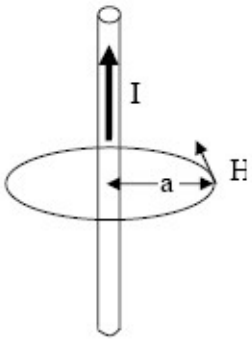
و باستعمال القانون (9-6) نجد أن شدة المجال الناشئ عن هذا التيار هي

$$H=\frac{I}{2\pi a} \qquad (9\text{-}8)$$

من هذه العلاقة نفهم اختيار وحدة A/m لشدة المجال، ونلاحظ أن شدة المجال لاتعتمد على نفاذية الوسط كما أشرنا إلى ذلك في نهاية الفصل السابق.



الشكل (٩- ١٤)قاعدة اليد اليمنى



الشكل (٩- ١٥) المغناطيس الناتج عن مرور تيار في سلك مستقيم طويل

مثال (٩- ٤):

يمر تيار كهربائي شدته 15A في سلك مستقيم طويل موضوع في الفراغ. **احسب** قيمة الحث المغناطيسي وشدة المجال الناتجين على بعد 4cm من السلك.

الحل:

نطبق المعادلتين (5-9) و(6-9) علماً أن في الفراغ $\mu=\mu_0=4\pi\times10^{-7}\,H/m$

$$B=\frac{\mu I}{2\pi a}=\frac{4\pi\times10^{-7}\times15}{2\pi\times4\times10^{-2}}=7.5\times10^{-5}\,T$$

$$H=\frac{I}{2\pi a}=\frac{15}{2\pi\times4\times10^{-2}}=59.7\,A/m$$

القوة الميكانيكية المؤثرة على موصل يحمل تياراً مستمراً في مجال مغناطيسي:

يحدد اتجاه القوة F التي تظهر على سلك حامل لتيار كهربائي I عند وضعه في مجال مغناطيسي كثافة فيضه B باستخدام قاعدة فليمنج لليد اليسرى الموضحة في الشكل (٩- ١٦) التي تنص على ما يلي: إذاً أشارت السبابة إلى اتجاه المجال، وأشارت الوسطى إلى اتجاه التيار فإن الإبهام سيشير إلى اتجاه القوة.

أما قيمة هذه القوة فهي:

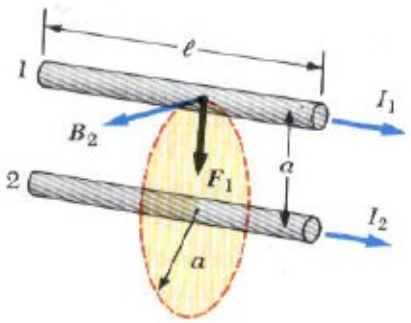
$$F = I B \ell \sin\theta \qquad (9\text{-}9)$$

حيث ℓ هو طول السلك و θ هي الزاوية بين اتجاه التيار وخطوط المجال. ونستنتج أن القوة تصل إلى قيمتها القصوى $IB\ell$ عندما يكون السلك عمودياً على المجال أي عندما $\theta = 90^\circ$. أما إذا كان السلك موازياً للمجال أي $\theta = 0^\circ$ فإن القوة تنعدم.

الشكل(٩-١٦)قاعدة فليمنج لليد اليسرى

القوة المغناطيسية المتبادلة بين موصلين يمر بهما تيار كهربي:

تعلمنا من المحاضرات السابقة أن كل سلك موصل يمر به تيار ينشأ حوله مجال مغناطيسي وأن لكل مجال مغناطيسي قوة مغناطيسية تؤثر على سلك يمر به تيار ولهذا إذاً وجد سلكان موصلان كما في الشكل (٩- ١٧)ويمر بكل منهما تيار كهربي I1 وI2 فإن المجال المغناطيسي B2 الناشئ عن التيار الثاني يؤثر بقوة مقدارها F1 ,يمكن التعبير عن القوة التي يؤثر بها موصل على آخر كما في الخطوات التالية:



الشكل (٩- ١٧)

لنعتبر المجال المغناطيسي الناشئ عن السلك 2 والتي تعطى قيمته بالمعادلة التالية:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \qquad (9\text{-}10)$$

يقع السلك الثاني في المجال المغناطيسي للسلك الثاني والذي يبعد عنه مسافة a كما في الشكل (٩- ١٧)

وبالتالي لأن قوة مغناطيسية F1 تعطى بالمعادلة التالية:

$$F_1 = I_1 \ell B_2 = I_1 \ell \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi a}\right) = \frac{\ell \mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \qquad (9\text{-}11)$$

والقوة لكل وحدة أطوال تعطى بالعلاقة التالية:

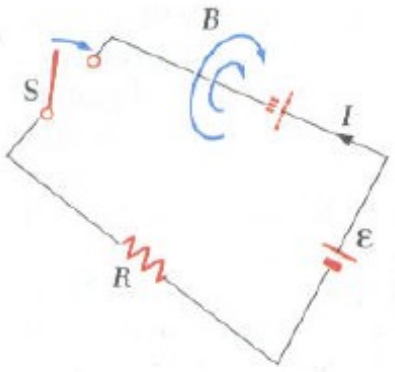
$$\frac{F_1}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \qquad (9\text{-}12)$$

و بالمثل نحصل على القوة المؤثرة على كل وحدة طول من السلك 2، F_2، وهي تساوي القوة F_1 في القيمة وتعاكسها في الاتجاه. أما اتجاه القوتين فإنه يعتمد على اتجاه التيارين، فإذا كان التياران في نفس الاتجاه يتجاذب السلكان، ويتنافران في الحالة الأخرى .

الحث الذاتي والحث المتبادل:

تعلمنا فيما سبق أن التيار ينشأ في الدائرة الكهربية عندما يتغير الفيض المغناطيسي خلال الدائرة مع الزمن. وفي هذه المحاضرة سندرس الحث الذاتي Self Inductance الذي ينشأ في الدائرة نفسها عند مرور تيار كهربي فيها أو بمعنى أدق عند غلق أو فتح الدائرة الكهربية. وهذا التأثير (الحث الذاتي) يلعب دوراً أساسياً في دوائر التيار المتردد حيث إن التيار يتغير باستمرار مع الزمن.

الحث الذاتي Self Inductance:



الشكل (٩- ١٨)

اعتبر دائرة كهربية مكونة من بطارية ومقاومة ومفتاح كهربي كما في الشكل (٩- ١٨)، عند غلقها فإن التيار المار في الدائرة لن يصل إلى قيمته العظمى فور غلق المفتاح إنما سوف يستغرق بعضاً من الوقت نتيجة لقانون فارادي .كيف ذلك؟

عند غلق المفتاح في الدائرة الكهربية يحدث ما يلي:

١. يزداد التيار المار في الدائرة مع الزمن.
٢. يزداد الفيض المغناطيسي خلال الدائرة نتيجة لازدياد التيار.
٣. الفيض المتزايد يؤدي إلى توليد قوة دافعة كهربية في الدائرة ليعاكس الزيادة في الفيض المغناطيسي Lenz's Law .

هذه القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الدائرة تعمل في اتجاه معاكس التيار الأصلي وهذا نتج عن الزيادة في الفيض المغناطيسي نتيجة لزيادة التيار عند غلق المفتاح... هذا التأثير في الدائرة يعرف باسم التأثير الحثي الذاتي.Self Induction

من قانون فارادي يمكننا إيجاد صيغة رياضية للتعبير عن الحث الذاتي .حيث ان الفيض المغناطيسي يتناسب مع المجال المغناطيسي والأخير يتناسب مع التيار في الدائرة لذا فإن القوة الدافعة الكهربية للحث الذاتي تتناسب مع التغير في التيار الكهربي.

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi_m}{dt} = -L\frac{dI}{dt} \qquad (9\text{-}13)$$

الحث الذاتي L في المغناطيسية يناظر السعة الكهربية C ويمكن التعبير عن الحث الذاتي L بالأبعاد الهندسية للدائرة. فإذا افترضنا ملفاً عدد لفاته N فإن Lتعطى بالعلاقة التالية:

$$L = \frac{N\Phi_m}{I} \qquad (9\text{-}14)$$

كما يمكن التعبير عن الحث الذاتي بالمعادلة التالية:

$$L = -\frac{\mathcal{E}}{dI/dt} \qquad (9\text{-}15)$$

وهذه المعادلة تعطي قيمة الحث الذاتي للدائرة بغض النظر عن أبعادها الهندسية وإنما تعتمد على قياس الكميات الفيزيائية مثل القوة الدافعة الكهربية والتغيير في التيار .وتكون وحدة الحث الذاتي هي الهنريHenry .

$$1\ \mathrm{H} = 1\ \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{A}} \qquad (9\text{-}16)$$

إيجاد الحث الذاتي من خلال قياس الأبعاد الهندسية :

اعتبر ملفاً عدد لفاته N لفة وطوله l أكبر بكثير من نصف قطر الملف .ينشأ عنه مجال مغناطيسي يعطى بالعلاقة التالية:

$$B = \mu_0 nI = \mu_0 \frac{N}{\ell} I \qquad (9\text{-}17)$$

أما الفيض الكهربي فيعطى بالعلاقة التالية:

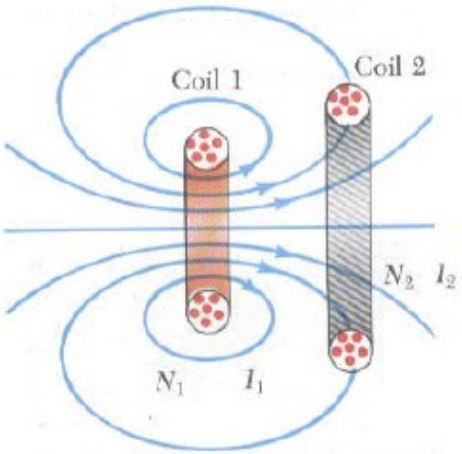
$$\Phi_m = BA = \mu_0 \frac{NA}{\ell} I \qquad (9\text{-}18)$$

$$L = \frac{N\Phi_m}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \qquad (9\text{-}19)$$

$$L = \mu_0 \frac{(n\ell)^2}{\ell} A = \mu_0 n^2 A\ell = \mu_0 n^2 (\text{volume}) \qquad (9\text{-}20)$$

ومن هذا يتضح أن الحث الذاتي للملف يعتمد على خواصه الهندسية (الطول والمساحة وعدد اللفات)

الحث المتبادل Mutual Inductance



الشكل (٩- ١٩)

نتيجة للتغير في التيار الكهربي في دائرة يؤدي ذلك إلى تغيير في الفيض المغناطيسي في دائرة كهربية مجاورة. وهذا بالتأكيد يولد قوة دافعة كهربية في تلك الدائرة ويسمى هذا التأثير بالتأثير الحثي المتبادل Mutual Inductance لأنه نتج من تأثير دائرة كهربية على أخرى.

في الشكل(٩- ١٩) توضيح للتأثير الحثي المتبادل حيث يوجد ملفان متجاوران يمر في الملف الأول وعدد لفاته N_1 تيار كهربي قيمته I_1 ينشئ مجالا مغناطيسياً يؤثر على الملف الثاني وعدد لفاته N_2 بفيض مغناطيسي Φ_{21} يؤدي إلى تيار حثي في الملف الثاني وقيمته I_2.

يعرف التأثير الحثي المتبادل M_{21} في الملف الثاني من خلال المعادلة التالية:

$$M_{21} \equiv \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} \qquad (9\text{-}21)$$

$$\Phi_{21} = \frac{M_{21}}{N_2} I_1 \qquad (9\text{-}22)$$

إذا كان التيار I_1 في الملف الأول متغيراً مع الزمن فإنه من قانون فارادي تكون القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الملف الثاني نتيجة للملف الأول هي:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} \qquad (9\text{-}23)$$

وبنفس الفكرة إذاً كان التيار I_2 في الملف الثاني متغيراً مع الزمن فإن من قانون فارادي تكون القوة الدافعة الكهربية المتولدة في الملف الأول نتيجة للملف الثاني هي:

$$\mathcal{E}_1 = -M_{12} \frac{dI_2}{dt} \qquad (9\text{-}24)$$

أي إن القوة الدافعة الكهربية المتولدة في ملف تتناسب طردياً مع معدل التغير في التيار الكهربي في الملف الآخر.

حالة خاصة:

في حالة ما يكون معدل التغير في التيار $(dI1/dt) = (dI2/dt)$ فإن القوة الدافعة الكهربية

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 \qquad (9\text{-}25)$$

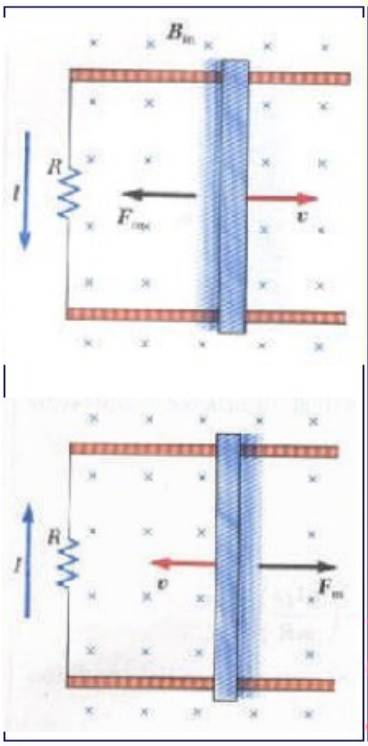
وهذا يعني أن

$$M_{21} = M_{12} = M \qquad (9\text{-}26)$$

وتكون قيمة القوة الدافعة الكهربية في الملفين تعطى بـ

$$\varepsilon_1 = -M\frac{dI_2}{dt} \qquad \varepsilon_2 = -M\frac{dI_1}{dt} \qquad (9\text{-}27)$$

وتكون وحدة الحث المتبادل هي الهنري Henry



نفترض مجالا مغناطيسيا خارجيا في اتجاه الصفحة للداخل كما هو موضح في الشكل بعلامة **X**. عند تحريك الساق المعدنية إلى اليمين يزداد الفيض المغناطيسي داخل الدائرة مع الزمن لأن المساحة تزداد. من قانون لينز ينشئ تيار حثي بحيث ينشئ قوة تقاوم حركة الساق إلى اليمين لتمنع الزيادة في الفيض المغناطيسي في الدائرة وعليه يكون اتجاه التيار الحثي عكس عقارب الساعة. لهذا التيار الحثي مجال مغناطيسي (في اتجاه خارج من الصفحة عكس المجال الخارجي) ليقاوم الزيادة في الفيض المغناطيسي.

إذا تحركت الساق المعدنية في المثال السابق إلى اليسار بحيث يقل الفيض المغناطيسي مع الزمن فإن التيار الحثي الناتج يكون مع عقارب الساعة بحيث يكون المجال المغناطيسي الناشئ عنه في اتجاه داخل على الصفحة (مع المجال المغناطيسي الخارجي) وذلك ليقاوم النقصان في الفيض المغناطيسي.

الفصل الخامس

الدوائر الكهربية المركبة

- يمكن استخدام قانون أوم في تحليل الدوائر الكهربية التي تحتوي علي مقاومة واحدة أو عدة مقاومات متصلة علي التوالي أو التوازي. ولكن هناك العديد من الدوائر الكهربية المعقدة التي لا يمكن تحليلها باستخدام قانون أوم بمفرده. وهناك العديد من الطرق والقوانين التي تسهل عملية تحليل الدوائر الكهربية المعقدة سنذكر منها ما يلي:-
- قانونا كيرشوف
- طريقة ماكسويل
- نظرية التراكم
- نظرية ثيفنين

قانونـــا كيرشوف

يمكن استخدام قانون أوم في تحليل (حساب التيار والجهد) الدارات الكهربائيـــة البسيطة التي تحتوي على مقاومة واحدة أو عدة مقاومات موصولة علـــى التسلـــسل والتفرع. ولكن هناك الكثير من الدارات الكهربائية المعقدة التي لا يمكـــن تحليلهـــا باستخدام قانون أوم بمفرده.

هناك العديد من القوانين والطرق التي تمكن من عملية تحليل الدارات الكهربائية المعقدة، ولعل أكثرها شيوعاً قانونا كيرشوف لتحليل الدارات الكهربائية المعقدة.

وضع العالم كيرشوف قانونين مهمين لتحليل الـــدارات الكهربائيـــة المعقـــدة، ويعرف القانون الأول باسم قانون كيرشوف للتيار، بينما يسمى القانون الثاني قانون كيرشوف للجهد. والآن لنشرح هذين القانونين بشيء من التفصيل.

1-5-1 قانون كيرشوف الأول للتيار

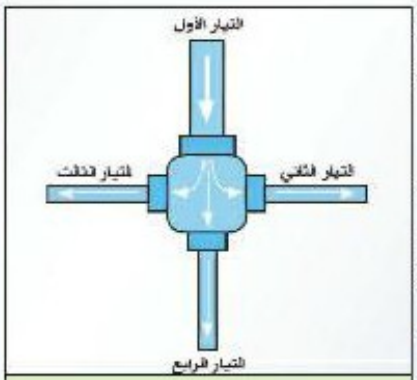
ينص هذا القانون على أن:

" **المجموع الجبري للتيارات الكهربائية في أي عقدة كهربائية يـــساوي صفراً.** ويمكن صياغة القانون بصورة أبسط، حيث يمكن القـــول إن **مجمـــوع التيارات الداخلة إلى عقدة معينة يساوي مجموع التيارات الخارجة من العقدة نفسها** " . يعبر عن قانون كيرشوف الأول بالعلاقة التالية:

$$\sum I = 0$$

الرمز (Σ) هو أحـــد الحروف اليونانـــيـــة ويدل على المجمـــوع ويقـــرأ "سيغما".

يشير المصطلح **المجموع الجبري** الوارد في قانوني كيرشوف إلى ضـــرورة الانتباه لنوع القطبية التي يتمتع بها كـــل تيار أو جهد كهربـــائي، وذلك بإعطائهـــا الإشارة المناسبة لها: إما إن تكون موجبة (+) أو تكون سالبة (−) .



الشكل (1 – 28) قانون كيرشوف

لفهم قانون كيرشوف الأول انظـــر الشكل (1 – 28) . لاحظ هنا أن التيـــار *الأول* هو الوحيد الداخل إلى العقدة، بينما هنالك ثلاثة تيارات (الثـــاني، الثالـــث ، والرابع) خارجة من العقدة نفسها . أي إنه

يوجد له طريق آخر سوى التفرع والخروج من العقدة، ويمكن كتابة ذلك بمعادلة كما يلي:

التيار 1 = التيار 2 + التيار 3 + التيار 4

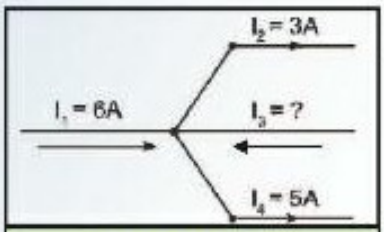
$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

لاحظ هنا أننا اعتبرنا التيار الداخل إلى العقدة موجباً والتيار الخارج من العقدة سالباً.

مثال 1:

أوجد قيمة واتجاه التيار (I_3) في الشكل (1 – 29) . وذلك باستخدام قانون كيرشوف الأول للتيار.



الشكل (1 – 28)

الحل:

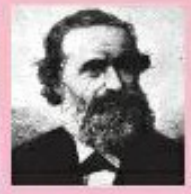
نفرض أن التيارين (I_1) و (I_3) داخلان إلى العقدة، بينما التياران (I_2) و (I_4) خارجان من العقدة. الآن إذا طبقنا قانون كيرشوف للتيار أي مجموع التيارات القادمة إلى نقطة معينة (عقدة) يساوي مجموع التيارات الخارجة من العقدة نفسها:

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

وبتعويض قيم شدة التيارات الكهربائية بالمعادلة السابقة نجد:

$$6 + I_3 = 3 + 5$$

$$I_3 = 8 - 6 = 2A$$



روبرت كيرشهوف (1824—1887)هو فيزيائي ألماني. اكتشف عنصري "السيزيوم والروبيديوم" وقام بوضع القوانين الأساسية لحل الدارات الكهربائية والمعروفة باسمه.

2-5-1 قانون كيرشوف الثاني للجهد

ينص هذا القانون على أن :

" المجموع الجبري للقوى المحركة الكهربائية المطبقة على حلقة مغلقة من دارة كهربائية يدور فيها التيار بجهة دوران واحدة، يساوي المجموع الجبري لحاصل جداء مقاومة كل جزء من هذه الحلقة في شدة التيار الذي يمر فيه ".

ويعبر عن قانون كيرشوف الثاني للجهد بالعلاقة التالية:

$$\sum E = \sum (R \times I)$$

ويمكن صياغة هذا القانون بصورة أبسط:

المجموع الجبري للقوى المحركة الكهربائية وفروق الجهود الكهربائي في أي حلقة مغلقة من دارة كهربائية ما يساوي صفراً .

ويعبر عن ذلك بالعلاقة الرياضية:

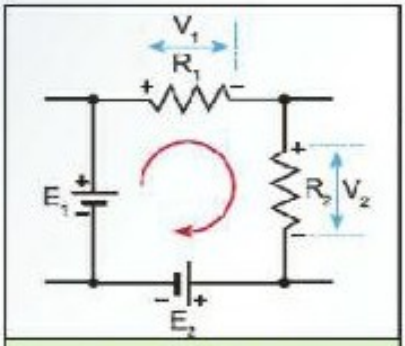
$$\sum E - \sum (R \times I) = 0$$

ملاحظة

يجب الانتباه إلى الإشارات الجبرية أثناء تطبيق هذا القانون. ويُعد اتجاه القوة المحركة الكهربائية للبطارية من القطب السالب إلى القطب الموجب لها بغض النظر عن اتجاه التيار في البطارية . أما اتجاه فرق الجهد بين طرفي المقاومة فهو اتجاه التيار نفسه فيها. فإذا افترضنا أن اتجاه دوران عقارب الساعة، هو الاتجاه الدوراني الموجب، فإن كل قوة محركة كهربائية وتيار كهربائي في اتجاه عقارب الساعة يكون موجباً وكل ما خالف ذلك يكون سالباً.

مثال 2:

طبق قانون كيرشوف الثاني للجهد على الحلقة المبينة في الشكل (1 – 30) .



الشكل (1 – 30)

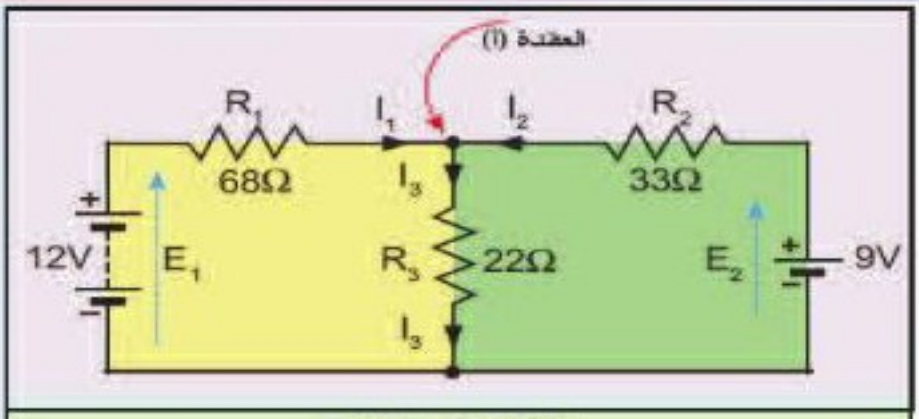
الحل:

$$E_1 - E_2 = V_1 + V_2$$

$$E_1 - E_2 = I\,(R_1 + R_2)$$

مثال 3:

احسب قيمة التيار المار في كل مقاومة في الدارة المبينة في الشكل (1 – 31) ، وذلك باستخدام قانوني كيرشوف الأول والثاني.



الشكل (1 – 31)

الحل:

بتطبيق قانون كيرشوف الأول للتيار على العقدة (أ) نجد:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

بتطبيق قانون كيرشوف الثاني للجهد على الحلقة اليسرى (الصفراء) نجد:

$$E_1 = I_1 \times R_1 + I_3 \times R_3$$

$$E_1 = I_1 \times R_1 + (I_1 + I_2) \times R_3$$

$$12 = 68\, I_1 + (I_1 + I_2) \times 22$$

$$12 = 90\, I_1 + 22\, I_2 \quad .....(1)$$

بتطبيق قانون كيرشوف الثاني للجهد على الحلقة الكبرى الخارجية (الصفراء + الخضراء) نجد:

$$E_1 - E_2 = I_1 \times R_1 - I_2 \times R_2$$

$$12 - 9 = 68\, I_1 - 33\, I_2$$

$$3 = 68\, I_1 - 33\, I_2 \quad .....(2)$$

والآن يجب علينا حل المعادلتين (1) و (2) . فنقوم بضرب المعادلة الأولى بـــ (3)، وضرب المعادلة الثانية بـــ (2) فنحصل على:

$$36 = 270\, I_1 + 66\, I_2$$

$$6 = 136\, I_1 - 66\, I_2$$

ثم نجمع هاتين المعادلتين فنحصل على:

$$42 = 406\, I_1$$
$$I_1 = 0.103\, A$$

ثم نعوض عن قيمة (I_1) في المعادلة الأولى:

$$12 = 90 \times 0.103 + 22\, I_2$$
$$I_2 = 0.124\, A$$
$$I_3 = I_1 + I_2 = 0.103 + 0.124 = 0.227\, A$$

إذا كانت قيمة شدة التيار سالبة عند تحليل الدارات الكهربائية، فهذا يعني أن اتجاه التيار الحقيقي معاكس لاتجاه التيار المفروض.

أسئلة

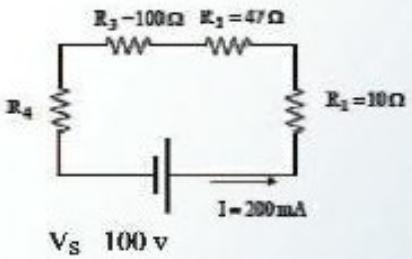
حل جميع المسائل الآتية:

المسألة الأولى:

إذا كانت شدة التيار ($I = 200$ mA) المار في الدارة الكهربائية المبينة في الشكل الآتي، والتي تحوي أربع مقاومات R_1، R_2، R_3، R_4 موصولة على التسلسل وقيمها $R_1 = 10\ \Omega$، $R_2 = 47\ \Omega$، $R_3 = 100\ \Omega$

وقيمة جهد المنبع $V_S = 100$ V والمطلوب:

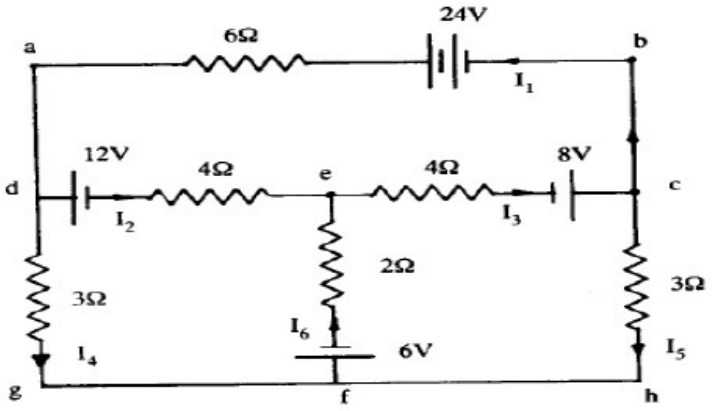
إيجاد قيمة المقاومة R_4 باستخدام قانون أوم وقانون كيرشوف الثاني للجهد.



المسألة الثانية:

احسب قيمة التيار الكلي I_T الداخل إلى العقدة A وذلك باستخدام قانون كيرشوف

في الدائرة التالية احسب I_1 ، I_2 ، I_3 ، I_4 ، I_5 ، I_6



الحـــــل

بتطبيق القاعدة الثانية نحصل على :

$\overrightarrow{abcda}$: $-24 - 8 + 12 = -6\,I_1 - 4\,I_3 - 4\,I_2$

$-20 = -6\,I_1 - 4\,I_3 - 4\,I_2$

$\therefore\ 10 = 3\,I_1 + 2\,I_3 + 2\,I_2$ ..... (A)

$\overrightarrow{defgd}$: $-12 + 6 = 4\,I_2 - 2\,I_6 - 3\,I_4$

$\therefore\ -6 = 4\,I_2 - 2\,I_6 - 3\,I_4$ ..... (B)

$\overrightarrow{echfe}$: $8 - 6 = 4\,I_3 + 3\,I_5 + 2\,I_6$

$\therefore\ 2 = 4\,I_3 + 3\,I_5 + 2\,I_6$ ..... (C)

وبتطبيق القاعدة الأولى على العقد c , e , d نحصل على :

d: $I_1 = I_2 + I_4$ $\quad\therefore I_1 - I_2 - I_4 = 0$ .... (D)

e: $I_3 = I_2 + I_6$ $\quad\therefore I_3 - I_2 - I_6 = 0$ .... (E)

c: $I_3 = I_1 + I_5$ $\quad\therefore I_3 - I_1 - I_5 = 0$ .... (F)

بحل المعادلات الست نحصل على قيمة التيارات المطلوبة وهي

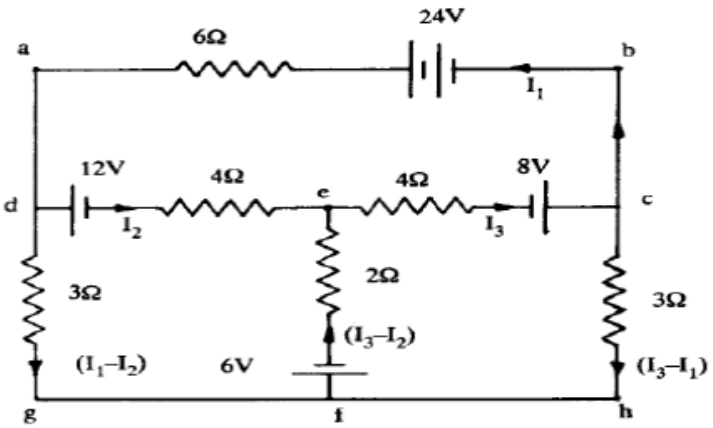
$$I_1 = \frac{26}{11}\,A,\quad I_2 = \frac{4}{11}\,A,\quad I_3 = \frac{12}{11}\,A$$

$$I_4 = 2\,A,\qquad I_5 = -\frac{14}{11}\,A,\quad I_6 = \frac{8}{11}\,A$$

وهذه طريقة أخرى لاختصار الحل عن طريق الاستغناء عن المعادلة الناشئة عن تطبيق قاعدة كيرشوف الأولى، وذلك بعدم فرض تيارات جديدة في بعض الفروع ووضعها بدلالة التيارات المفترضة في الفروع الأخرى، وهذا يؤدي إلى تقليل عدد المجاهيل، وبالتالي عدد المعادلات اللازمة للحصول على قيم هذه المجاهيل، مما يؤدي بها إلى تبسيط الحل الرياضي في نهاية الأمر ويمكن توضيح هذه الطريقة بحل المثال السابق بطريقة ماكسويل كالآتي:

في المثال السابق نجد ان التيار I_1 يتفرع عند النقطة d الى فرعين أحدهما I_2 والثاني I_4 لذلك يمكن استبدال I_4 بـ (I_1-I_2) وكذلك التيار I_3 عند النقطة c يتفرع

إلى I_1 ، I_5 وتستبدل I_5 بالتيار $(I_3 - I_1)$ وكذلك يستبدل I_6 بـ $(I_3 - I_2)$. وتصبح الدائرة كالشكل التالي.



وواضح أن عدد المجاهيل أصبحت ثلاثة وهي I_1 ، I_2 ، I_3 وبذلك يكتفى بثلاث معادلات لتحديد ثلاثة مجاهيل بينما يحتاج الوضع الأول في المثال السابق إلى ست معادلات لمعرفة ستة مجاهيل.

وبتطبيق قاعدة كيرشوف الثانية نحصل على:

$$\overrightarrow{abcd}: \quad -24 - 8 + 12 = -6\,I_1 - 4\,I_2 - 4\,I_3$$

$$\therefore\ 10 = 3\,I_1 + 2\,I_3 + 2\,I_2 \quad \ldots\ldots\ldots (A)$$

$\overrightarrow{defg}$: $-12 + 6 = 4I_2 - 2(I_3 - I_2) - 3(I_1 - I_2)$

$\therefore -6 = 9I_2 - 2I_3 - 3I_1$ .....(B)

$\overrightarrow{echf}$: $8 - 6 = 4I_3 + 3(I_3 - I_1) + 2(I_3 - I_2)$

$\therefore 2 = 9I_3 - 3I_1 - 2I_2$ ..... (C)

بحل هذه المعادلات الثلاث

$$I_1 = \frac{26}{11}\,A, \quad I_2 = \frac{4}{11}\,A, \quad I_3 = \frac{12}{11}\,A$$

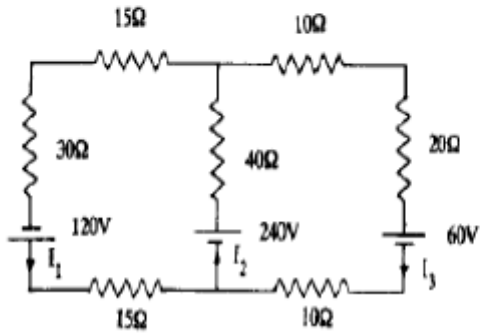
وبعد معرفة هذه التيارات يمكن معرفة بقية التيارات في الأفرع الأخرى

نظرية التراكم Super-position theorem

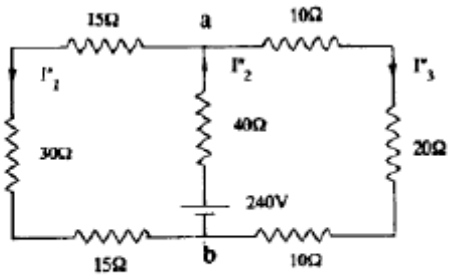
هذه طريقة أخرى لحل الدوائر الكهربية المركبة وتتم بحساب تأثير كل مصدر كهربي على حدة، مع حذف المصادر الكهربائية الأخرى في الدائرة، ثم جمع النتائج معا جمعا جبريا للحصول على النتيجة النهائية.

مثال

أوجد التيار الذي يمر في كل بطارية من البطاريات الموجودة في الشكل التالي:



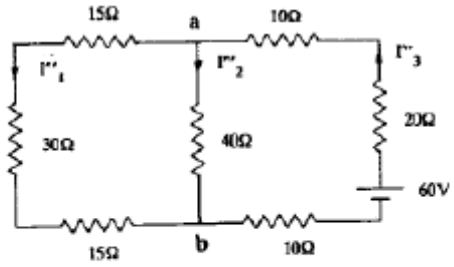
لحل هذه المسألة بطريقة التراكم نفرض وجود مصدر كهربي واحد ونحذف المصدرين الآخرين ونحسب التيارات في الفروع المختلفة. وبعد تكرار هذه العملية لكل مصدر نقوم بجمع التيارات الناتجة في كل فرع للحصول على التيارات المطلوبة:



(ب)

ب ـ المصدر الكهربي (240V) في شكل (ب) باتباع الطريقة السابقة نفسها نحصل على :

$I_1'' = 1.5\ A\ ,\ I_2'' = 3.75\ A\ ,\ I_3'' = 2.25\ A$.

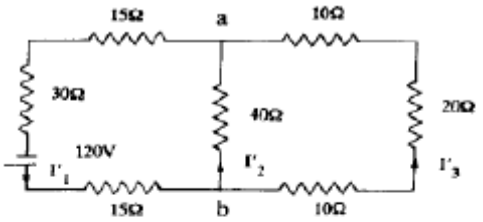


(ج)

جـ ـ المصدر الكهربي (60 V) كما في شكل (جـ) باتباع الطريقة نفسها نحصل على :

$$I_1'' = 0.375\ A\ ,\quad I_2'' = 0.562\ A\ ,\quad I_3'' = 0.937\ A$$

ا ـ المصدر الكهربي (120 V) كما في شكل (أ).



(أ)

لحساب I'_1 نحسب المقاومة الكلية للدائرة

$$R' = 10 + 20 + 10 = 40\Omega$$

وهذه المقاومة متصلة مع المقاومة الأخرى

$$\therefore \frac{1}{R_{ab}} = \frac{1}{40} + \frac{1}{40} \quad \therefore R_{ab} = 20\Omega$$

وتكون المقاومة الكلية هي :

$$R = 20 + 15 + 15 + 30 = 80\Omega$$

$$\therefore I'_1 = 120/80 = 1.5\ A$$

ولحساب I'_2 ، I'_3 نحسب فرق الجهد بين الطرفين a ، b.

$$V_{ab} = I'_1 \times R_{ab} = 1.5 \times 20 = 30\ V$$

$$I'_2 = 30/40 = 0.75\ A$$

$$I'_3 = 30/40 = 0.75\ A$$

للحصول على التيارات في الفروع الثلاثة يجب جمع التيارات الجزئية الثلاثة في كل فرع جمعا جبريا.

$$\therefore I_1 = I_1' + I_1'' + I_1''' = 1.5 + 1.5 + 0.375 = 3.375\ A$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' + I_2''' = 0.75 + 3.75 - 0.562 = 3.938\ A$$

يلاحظ أن I_2''' أعتبر سالبا لأنه في عكس اتجاه التيارين I_2' و I_2'' اللذين اعتبرا موجبين، كما أن التيار الكلي I_2 في اتجاه التيارين I_2' و I_2''

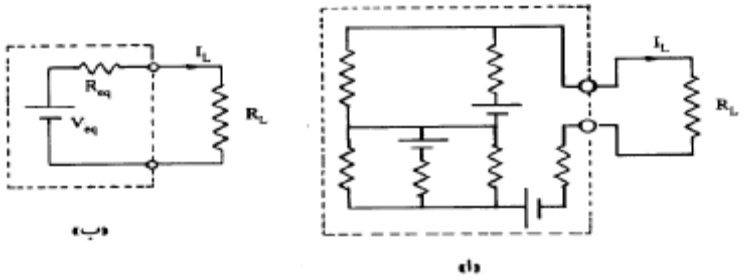
$$I_3 = I_3' + I_3'' + I_3''' = -0.75 + 2.25 - 0.937 = +0.563\ A$$

نظرية ثيفنين Thevenin theorem

يسهل تحليل بعض الدوائر الكهربية باستبدال الشبكة الكهربية المعقدة (network) التي تحتوي على مجموعة من مصادر الجهد وعلى مجموعة من المقاومات بدائرة مكافئة (equivalent circuit) لها المميزات الأصلية نفسها.

ومن أشهر الدوائر المكافئة الدائرة المستنتجة من نظرية ثيفنين والتي تنص على أن:

"أي شبكة كهربية مكونة من عدة مقاومات وبطاريات يمكن استبدالها بمقاومة واحدة وبطارية مكافئة متصلتين على التوالي".



$$V_{eq} = (R_L + R_{eq})\, I_L$$

اذا أردنا ايجاد التيار والجهد لعنصر ما بين عقدتين في الدائرة نتبع الخطوات التاليه:

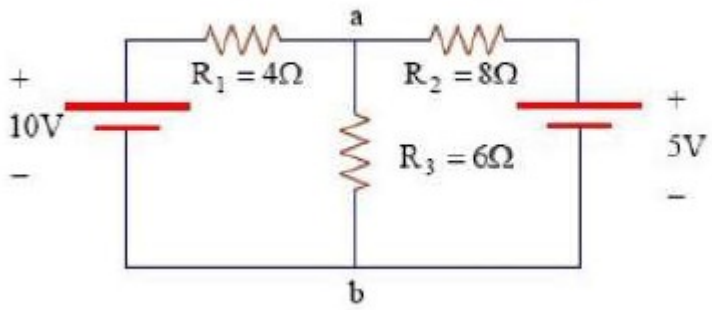
ل ازاله للفرع المطلوب ايجاد التيار فيه وهو ما يسمي بفتح الدائرة وذلك بغرض حساب فرق الجهد بين النقطتين ويرمز له بالرمز V_{th}

عمل قصر علي مصادر التغذيه الموجوده في الدائرة (اي جعل قيمتها = ٠) وذلك بغرض حساب قاومه الكليه للدائرة و يرمز لها بالرمز (R_{th}) يذكر هنا عند ايجاد R_{th} ينظر للدائرة بين النقطتين المحصور بينهما العنصر المطلوب حساب التيار فيه.(

سم مكافئ ثفنن ويتكون من V_{th} كمصدر تغذيه متصل علي التوالي مع R_{th} ثم العنصر المطلوب حساب التيار فيه ويصبح قيمة التيار المار في العنصر المحصور بين النقطتين كما يلي:

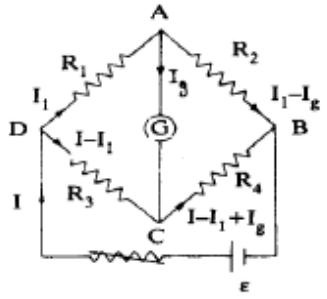
$$I=V_{th}/(R_{th}+r)$$

في الدائرة التالية أوجد قيمة التيار في الفرع b ، a باستخدام نظرية ثفنن.



قناطر التيار المستمر

يمثل شكل (١٦-٤) قنطرة ويتستون ومبين عليها اتجاه التيارات في فروع القنطرة وإذا فرض أن R_g هي مقاومة الجلفانومتر G فإنه بتطبيق قاعدة كيرشوف الثانية على الدائرة المغلقة ACDA يُحصل على :



شكل (١٦-٤) : قنطرة ويتستون

$$I_1 R_1 + I_g R_g - (I - I_1) R_3 = 0$$

أو

$$I_1 (R_1 + R_3) + I_g R_g - I R_3 = 0 \quad \ldots\ldots \quad (٤-٥١)$$

وبصورة مماثلة بالنسبة للدائرة المغلقة ABCA يُحصل على :

$$(I_1 - I_g) R_2 - (I - I_1 + I_g) R_4 - I_g R_g = 0$$

أو

$$I_1 (R_2 + R_4) - I_g (R_g + R_2 + R_4) - I R_4 = 0 \quad (٤-٥٢)$$

وبضرب المعادلة (٤-٥١) بمقدار $(R_2 + R_4)$ والمعادلة (٤-٥٢) بمقدار $(R_1 + R_3)$ ثم الطرح يُحصل على:

$$I_g [R_g (R_2 + R_4) + (R_1 + R_3)(R_g + R_2 + R_4)] + I [R_4 (R_1 + R_3) - R_3 (R_2 + R_4)] = 0$$

$$\therefore \frac{I_g}{I} = \frac{R_3 R_2 - R_4 R_1}{R_g (R_2 + R_4) + (R_1 + R_3)(R_g + R_2 + R_4)}$$

وفي هذه الحالة يكون $I_g = 0$ عندما يكون $R_3 R_2 = R_4 R_1$

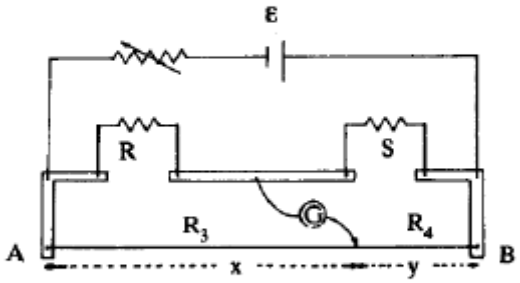
$$\therefore \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٤-٥٣)$$

وبهذه الشروط تكون القنطرة متزنة وينعدم مرور تيار خلال الجلفانومتر. هذه القنطرة تستخدم لقياس المقاومات ذات القيم المتوسطة أو للمقارنة بينها وقد استخدمها لأول مرة العالم شارل ويتستون في عام ١٨٤٣ ميلادية ولذلك عرفت باسمه.

القنطرة المترية

والقنطرة المترية هي صورة أخرى لقنطرة ويتستون. حيث يستعمل عوضا عن المقاومتين R_3 و R_4 سلك معدني يمكن تغيير طول جزئيه، وبذلك تتغير قيمة كل من R_3 و R_4 تبعا لطول جزئي السلك.

فإذا فرض أن الدائرة [شكل (٤-١٧)] في حالة اتزان وكانت مقاومة الطول x هي R_3 ومقاومة الطول y هي R_4 فإن:



شكل (٤-١٧): القنطرة المترية

$$\frac{R}{S} = \frac{R_3}{R_4} \quad \ldots \quad (٤-٥٤)$$

$$R_3 = \varrho \frac{x}{S} \quad , \quad R_4 = \varrho \frac{y}{S}$$

حيث ρ هي المقاومة النوعية لمادة السلك، وهو عادة من مادة المنقنين أو الكونستنتان، و S مساحة مقطع السلك. وبالتعويض في المعادلة (٤٥٤) يُحصل على:

$$\frac{R}{S} = \frac{x}{y} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (٤-٥٥)$$

أي أنه بقياس الطولين x و y «علما بأن $x + y = 100\,cm$ » يمكن تعيين قيمة المقاومة المجهولة R إذا علمت S.

ويمكن الوصول إلى العلاقة (٤٥٥) بطريقة أخرى وهي :

إذا فرض أن r هي مقاومة وحدة الأطوال فإن :

$$R_3 = rx \quad , \quad R_4 = ry$$

وبالتعويض في المعادلة (٤٥٤) نحصل على المعادلة (٤٥٥)

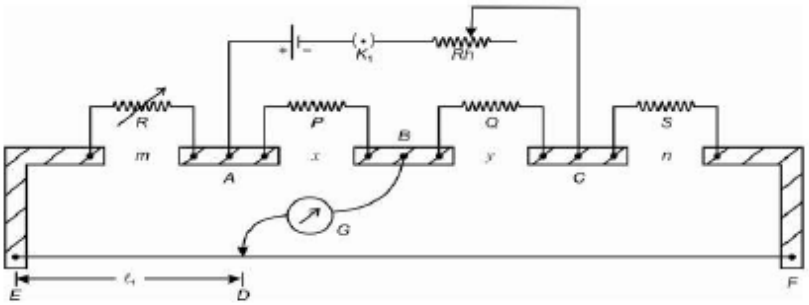
الخطأ الطرفي

وللقنطرة المترية خطأ واحد يعرف بالخطأ الطرفي (end correction) والذي ينتج عن جزء السلك الملتحم مع مسماري التوصيل B و A والذي أهمل حسابه عند قياس كل من الطولين x و y وهذا الخطأ يتطلب معرفته في حالة دقة قياس مقاومة مجهولة.

لنفرض أن هذا الخطأ عند مسمار التوصيل A مقداره α أوم وعند مسمار التوصيل B هو β أوم فعند توفر شرط الاتزان نجد أن :

$$\frac{R}{S} = \frac{rx \pm \alpha}{ry \pm \beta} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (٤-٥٦)$$

ويلزم في حالة القياس الدقيق تعيين كل من α و β ويستخدم لذلك جهاز يعرف بقنطرة كاري فوستر.



يمثـل شكـل (١٨-٤) قنطرة كاري فوستر، وهي تعديل لقنطرة ويتستون حيث إنه بواسطتها يمكن تعيين أو تلافي الخطأ الطرفي، حيث P ، Q مقاومتان متساويتان في القيمة تقريبا ولا حاجة لمعرفة قيمتهما الفعلية . R و S مقاومتان أخريان «تكونان بمثابة ازدياد الطول لسلك القنطرة L مما يزيد حساسيتها للمقاومة بين المقاومات المتقاربة» وقيمتها أيضا متقاربة ويجب معرفة القيمة الفعلية للمقاومة S.

فإذا فرض أن الخطأ الطرفي عند A و B هما α و β أوم على التوالي فإنه عند حالة الاتزان يكون :

$$\frac{P}{Q}=\frac{R+\alpha+\ell_1 r}{S+\beta+(100-\ell_1)r},$$

وإذا استبدلت المقاومتان R و S كل مكان الأخرى فإنه عند حالة الاتزان يُحصل على:

$$\frac{P}{Q}=\frac{S+\alpha+\ell_2 r}{R+\beta+(100-\ell_2)r}.$$

$$\frac{R+\alpha+\ell_1 r}{S+\beta+(100-\ell_1)r}=\frac{S+\alpha+\ell_2 r}{R+\beta+(100-\ell_2)r}.$$

$$\frac{R+\alpha+\ell_1 r}{S+\beta+(100-\ell_1)r}+1=\frac{S+\alpha+\ell_2 r}{R+\beta+(100-\ell_2)r}+1$$

$$\frac{R+S+\alpha+\beta+100\,r}{S+\beta+(100-\ell_1)r}=\frac{R+S+\alpha+\beta+100\,r}{R+\beta+(100-\ell_2)\,r}.$$

المراجع

1- أساسيات الفيزياء الكلاسيكية والمعاصرة رأفت كامل واصف دار النشر للجامعات ، 2005 - مصر
2- الكهربية والمغناطيسية أ د محمد بن على احمد آل عيسى قسم الفيزياء كلية العلوم جامعة الملك سعود -السعودية
3- مذكرة الكهرباء والتيار المتردد د عماد على احمد قسم الفيزياء كلية الغلوم جامعة جنوب الوادى – مصر
4- المغناطيسية والتيار المتردد د. حازم فلاح سكيك جامعة الأزهر – غزة
5- دوائر التيار المتردد لمهنة الالكترونيات والاتصالات – وزارة التربية – سوريا – 2013
6- نظرية الدارات الكهربية د عبدالوهاب ترجمان
7- اسس الهندسة الكهربية د محمد على عثمان و د سميح الجابى
8- by R.A. Seaway Physics for scientists and engineering physics
9- د /اسعد عبدالخالق محاضرات فى الكهرومغناطيسية جامعة الملك سعود
10- الميكرسكوب الالكترونى د حازم سكيك جامعة الازهر – غزة
11- مواضيع متفرقة من شبكة الانترنت